

Concepto moderno de la consonancia musical

J. Mariano Merino de la Fuente
Depto. de Didáctica de las Ciencias Experimentales
Facultad de Educación
Universidad de Valladolid
DP 47014

PACS: 43.75.-z

Resumen

Se hace una revisión en profundidad del concepto de consonancia que tradicionalmente se ha venido aceptando, a la luz de los más recientes avances en Física de la audición. Al propio tiempo, y como aportación personal del autor de este artículo, se incluye un método cómodo y fácil de evaluar el nivel de consonancia de los distintos intervalos en función de la contribución de los armónicos de los sonidos.

Abstract

In this paper, a explanation of the modern biophysics foundations of the musical consonance sensation is made. Moreover, a simple didactic way to understand the consonance level of several musical intervals, is proposed here.

Consonancia y disonancia

Concepto tradicional de consonancia

La obtención de combinaciones de frecuencias agradables al oído ha sido durante siglos una constante en las pretensiones de los compositores, que han buscado unánimemente que los sonidos emitidos de forma simultánea gozaran de una cierta fusión que diera homogeneidad a la

Intervalo	Relación de Frecuencias	Ejemplo sobre la tónica (C ₄ de la escala temperada)
Octava justa	2/1	C(523,2)/C(261,6)
Quinta mayor	3/2	G(392,0)/C(261,6)
Cuarta justa	4/3	F(349,2)/C(261,6)
Tercera mayor	5/4	E(329,6)/C(261,6)
Sexta mayor	5/3	A(440,0)/C(261,6)
Tercera menor	6/5	E _♭ (311,1)/C(261,6)
Sexta menor	8/5	B _♭ (466,2)/C(261,6)

percepción armónica. Tradicionalmente, a los sonidos que cumplen esa condición, se les llama consonantes.

Por el contrario, la disonancia entre dos o más sonidos tiende a considerarse, no como un fenómeno positivo, sino como la falta de consonancia, asociándolo siempre a la idea de sonido desagradable, puesto que adolecen de esa unidad y coherencia entre ellos.

La regla tradicional empleada por los músicos establece que, cuanto más simple sea la relación de frecuencias de dos sonidos, más consonante será el intervalo que forman. De acuerdo con este enunciado, puede establecerse un orden relativo de los intervalos tradicionalmente considerados como consonantes.

En la tabla se aprecia que las relaciones de frecuencias expresadas en la columna de ejemplos no coinciden exactamente con las relaciones pitagóricas que aparecen en la columna central, debido a que se trata de intervalos “temperados”. Estos intervalos fueron creados por los músicos españoles Bartolomé Ramos de Pareja (S. XV) y Francisco de Salinas (S. XVI)

Otra regla para valorar la consonancia de un intervalo se basa en la existencia de batidos, los cuales pueden darse entre las frecuencias fundamentales o entre algunos de sus armónicos. La práctica demuestra que, para el centro del espectro audible, frecuencias de pulsación comprendidas entre 30 y 130 Hz, dan como resultado una sensación desagradable. Dicho de otro modo, dos sonidos cuyas frecuencias difieran en 45 Hz, lo cual es el caso de dos notas correspondientes a dos teclas blancas vecinas en la octava central de un piano, darían una combinación disonante.

En consecuencia, puede distinguirse entre *consonancia perceptiva* y *consonancia musical* (Deutch, 1982)¹, la primera está directamente relacionada con la proximidad de frecuencias y la posible presencia de batidos (Helmholtz, 1885)² mientras que la segunda, de uso extendido entre los

músicos, tiene que ver con las relaciones de frecuencias que definen los intervalos.

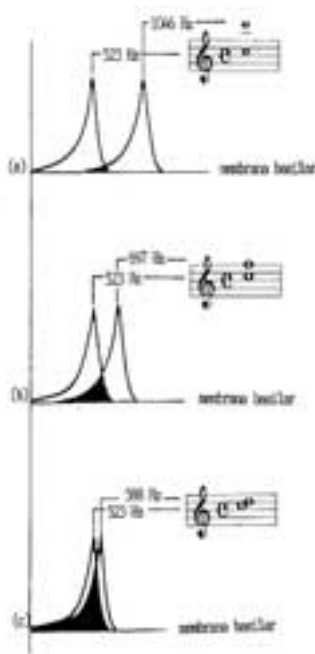


Figura 1. Excitación de la membrana basilar por dos sonidos senoidales puros separados por intervalo (a) de octava (b) cuarta justa y (c) segunda mayor. Excepto en el primer caso, la membrana presenta una zona en la que se superponen las dos excitaciones, pero ello no impide que el cerebro perciba ambos sonidos indistintamente identificando los picos de máxima afectación

Banda crítica y consonancia

Según los estudios de Békésy, así como los de Plomp, la presencia de batidos no produce necesariamente una sensación desagradable. Si la frecuencia de un batido es baja, el oído aprecia simplemente un trémolo, no una disonancia. Por el contrario, dos sonidos cuyas frecuencias difieran lo suficiente como para no producir pulsaciones audibles, pueden producir al sonar juntos, una sensación de aspereza.

La sensación de consonancia está íntimamente ligada al comportamiento de nuestro sistema psicoacústico, por ello, para comprender el concepto de consonancia en toda su extensión, es preciso considerar cómo se comporta el oído cuando recibe simultáneamente dos frecuencias distintas.

De acuerdo con el modelo teórico propuesto por Békésy³, cuando un tono puro es recibido por el oído, la excitación que produce en la membrana basilar se extiende a una zona de la misma y el cerebro identifica el tono localizando el punto más afectado de dicha zona (fig 1).

Cuando dos tonos puros están tan próximos que hay una

considerable superposición entre sus envolventes de amplitud en la membrana basilar la sensación producida será disonante (a). Por el contrario, si la separación de frecuencias es mayor la sensación disonante desaparece, aún cuando pueda haber una cierta superposición entre las envolventes de amplitud (b). Estos hechos permiten establecer el concepto de *banda crítica* para una determinada zona de la membrana basilar, como la mínima separación entre dos tonos puros simultáneos que no produzcan sensación desagradable.

Se estima que en la membrana basilar hay 24 bandas críticas de una anchura media de 1,3 mm conteniendo unos 1.300 terminales neuronales cada una. Ahora bien, el ancho de banda crítica varía con la frecuencia central, siendo casi constante a frecuencias inferiores a 500 Hz y proporcional a la frecuencia central por encima de 500 Hz (fig. 2).

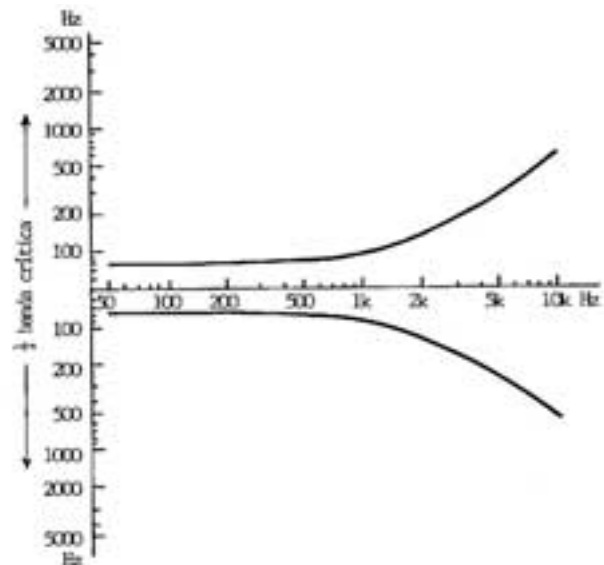


Figura 2. Variación del ancho de banda crítica con la frecuencia

En términos musicales, puede decirse que, por encima de 500 Hz, las bandas críticas son prácticamente iguales que 1/3 de octava, o lo que es lo mismo, 3ª M. Es necesario destacar que la membrana basilar no está parcelada en bandas críticas, de forma que cualquier punto de la misma puede ser centro de una de ellas (Rossing, 1990)⁴

La existencia de las bandas críticas induce a pensar en una pobre discriminación del tono, pero en realidad no es así, ya que el cerebro discierne el tono de los sonidos identificando el pico de máxima excitación en la membrana basilar.

Si consideramos frecuencias n que varíen desde valores muy por debajo de n_0 hasta muy superiores, el resultado producido al hacer coincidir ambos sonidos sufre variaciones impor-

³HELTMOHLTZ, H (1885), "On the Sensation of Tone", Reprint by Dover Publications Inc. (1954) (ISBN 0-486-60753-4)

⁴BÉKÉSY, G. (1960), "Experiments in hearing", Acoust. Soc. Amer. Mc. Graw Hill (USA)

tantes (Plomp and Levelt, 1965)⁵. Hay un amplio margen de frecuencias para el que se producirá consonancia, a medida que n crece aparece una sensación de aspereza creciente que desemboca en la aparición de batidos audibles. Al aproximarse la frecuencia variable n al valor fijo n_0 , la frecuencia de los batidos desciende dando lugar a una sensación de trémolo, relativamente agradable, que termina con la desaparición total de los batidos cuando n llega a alcanzar el valor n_0 . A partir de aquí, el crecimiento de n reproduce en sentido inverso la anterior secuencia: trémolo, batidos, aspereza y de nuevo consonancia.

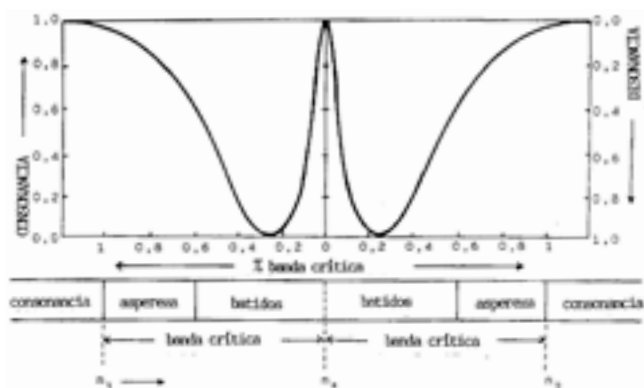


Figura 3 Evolución de la consonancia producida por dos sonidos senoidales puros en función de su separación. Uno de ellos tiene frecuencia constante n_0 y el otro aumenta progresivamente desde valores muy bajos, pasando por el valor n_1 hasta el n_2 para continuar luego su aumento.

La fig. 3 representa el efecto anteriormente descrito, se obtuvo a partir de experimentos realizados con cientos de individuos y se ajusta aceptablemente a una ecuación polinómica del tipo:

$$C = 13,64 x^4 - 36,28 x^3 + 32,80 x^2 - 10,13 x + 1$$

en la que x representa la fracción de banda crítica y el grado de consonancia.

De acuerdo con todo lo expuesto, puede establecerse teóricamente que todas aquellas frecuencias que sean percibidas simultáneamente y coincidan dentro de una banda crítica, contribuirán en mayor o menor medida a la sensación disonante.

Los experimentos realizados por Plomp revelan que el intervalo mas disonante es aquel en el que las frecuencias de los dos tonos puros están separadas un 25 % de la banda crítica. En efecto, las frecuencias que difieren en un margen del 5 al 50 % de sus bandas críticas son juzgadas como típicamente disonantes.

Por lo tanto, podemos llegar a la conclusión de que dos tonos puros con una diferencia en frecuencias inferior al 50 % de las correspondientes bandas críticas es una disonancia.

⁴ ROSSING, T. (1990), "The science of sound", Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

⁵ PLOMP, R & LEVELT, W., (1965) "Tonal consonance and critical bandwidth", J. Acoust. Soc. Am., 38, 548

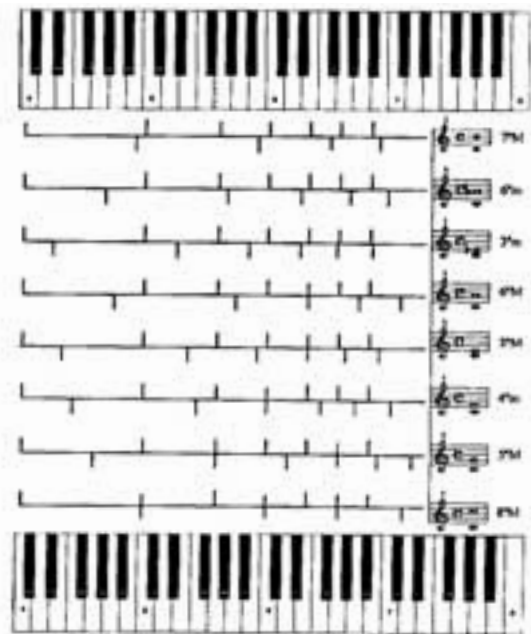


Figura 4. Representación de parejas de sonidos formando distintos intervalos. Tanto las frecuencias fundamentales como los armónicos, se han representado con trazos verticales, identificando sus frecuencias con las teclas de un piano. De este modo pueden reconocerse fácilmente las contribuciones de aquellos armónicos que, por su proximidad inferior a una 3ª m, son disonantes.

Un método didáctico para comprender el efecto de disonancia

Como vemos, la comprensión del efecto de disonancia de dos sonidos musicales simultáneos no puede reducirse a las simples reglas de la relación de las frecuencias fundamentales o de la existencia de batidos audibles, sino que tiene relación con el timbre de los sonidos percibidos, los complejos mecanismos de la audición y de la actividad cerebral.

Se propone en este artículo un método sencillo que permite observar la intervención de los armónicos superiores en el efecto de la disonancia así como apreciar su importancia en la sensación global. También permite establecer de manera sencilla la calidad consonante relativa de los distintos intervalos habitualmente empleados en música.

Supongamos un piano ideal cuyas cuerdas emitiesen sonidos senoidales puros. Así, al pulsar la tecla C_4 emitiría un tono puro de 261,63 Hz. Si quisiéramos obtener con este piano un sonido C_4 de un piano real, tendríamos que pulsar simultáneamente las teclas C_5 (523,26 Hz); C_6 (784,89 Hz); C_7 (1046,52 Hz), ... con una fuerza proporcional a la intensidad de los armónicos superiores en el espectro acústico.

Para estudiar los efectos disonantes producidos por dos notas emitidas simultáneamente por dos instrumentos es preciso identificar qué frecuencias, tanto fundamentales como superiores, coinciden dentro de una misma banda crítica.

La figura 4 muestra las contribuciones disonantes para los intervalos musicales más usuales, producidos por dos instrumentos ideales cuyos armónicos fueran todos de la misma intensidad. En este diagrama se han señalado aquellos sonidos que contribuyen al efecto disonante por estar dentro de una misma banda crítica. Siguiendo la regla de los músicos, esos sonidos son los que se encuentran a intervalo menor que una 3ª m, lo cual puede apreciarse con facilidad en el diagrama, en el que los ejes horizontales se han sustituido por teclados.

Los trabajos de Plomp (1976)⁶ revelan que, para frecuencias n_o superiores a 750 Hz, el ancho de banda crítica es aproximadamente, igual al 20 % de n_o . Así pues, para calcular la contribución disonante de dos armónicos n_1 y n_2 próximos en la fig.4 se procede de la siguiente manera:

n_1 = orden del armónico . frecuencia fundamental

n_2 = orden del armónico . frecuencia fundamental

ancho de banda crítica = $(1/5)(n_1+n_2)/2$

fracción de banda crítica = $(n_2-n_1)/$ ancho de banda crítica

grado de consonancia: C (hacer uso de la ecuación)

contribución disonante: 1-C

En el caso de sonidos reales, es preciso tener en cuenta que los armónicos superiores tienen una intensidad distinta que la

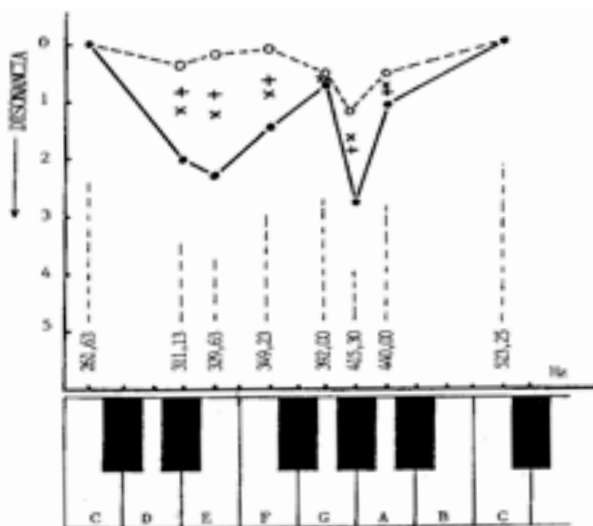


Figura 5. Influencia de la composición espectral de los sonidos en la sensación de consonancia. Un Do de 261,63 Hz suena simultáneamente con: Mi_b, Mi, Fa, Sol, La_b, La y Do

- ° Tubo cerrado ideal (sólo armónicos impares, todos de la misma intensidad)
- Tubo abierto ideal (todos los armónicos, de la misma intensidad)
- + Clarinete (armónicos segundo y cuarto muy atenuados)
- * Trompeta

⁶ PLOMP, R (1976), "Aspects of Tone Sensation", Academic Press, London

frecuencia fundamental, por lo que en estos casos, la contribución disonante debe ser multiplicada por la fracción de nivel de intensidad (db) respecto de la frecuencia fundamental.

Este proceso permite determinar el contenido disonante total de un intervalo como suma de todas las contribuciones disonantes entre sus armónicos. Ello permite establecer un orden de los intervalos, desde el más consonante hasta el más disonante.

La figura 5 representa la variación de la consonancia para los distintos intervalos musicales, para los casos de un tubo abierto ideal (todos los armónicos de igual intensidad), tubo cerrado ideal (armónicos pares ausentes), un clarinete en su tesitura *chalmereau* (escasez de armónicos 2º y 4º) y una trompeta.

Conclusiones

Hemos visto que en un principio, el concepto de consonancia fue reducido a un conjunto de reglas basadas en la relación de las frecuencias fundamentales o con la existencia de batidos.

Desde hace varias décadas, se acepta que la composición espectral de dos tonos complejos simultáneos es importante en orden a determinar el grado de coherencia consonante entre ambos y también se tiene en cuenta la estructura y comportamiento del oído interno por medio de la introducción del concepto de banda crítica. Todo ello hace que la estimación de la consonancia entre dos tonos sea una tarea complicada.

El diagrama que en este artículo se presenta (fig. 4) reúne en una sola imagen las tres causas determinantes de la sensación disonante: la relación de frecuencias fundamentales, la superposición de armónicos superiores y la banda crítica. Su empleo satisface a músicos y físicos por igual, resultando útil y cómodo para estimar el grado de consonancia entre dos tonos complejos simultáneos y para establecer comparaciones en torno al carácter consonante de los distintos intervalos musicales.

Por otro lado, es preciso tener en cuenta la componente subjetiva de las sensaciones acústicas, las cuales también afectan a la cuantificación del carácter consonante.

Desde muy antiguo, los músicos han compuesto y ejecutado la música siguiendo el principio de la consonancia, y esto es algo que valoramos como positivo. Ahora bien, ¿se debe a un conjunto de causas físicas y neurosensoriales o es sencillamente un proceso de educación?. Una partitura dodecafónica de A. Schönberg es alta y continuamente disonante para oídos acostumbrados a J.S. Bach y L.V. Beethoven, mientras los partidarios de este tipo de música reciben con gran satisfacción cada golpe disonante. Diferencias tan profundas hacen difícil sacar conclusiones definitivas en cuestiones de consonancia y disonancia.