

Comprobación experimental de la teoría de la consonancia y disonancia musical



Olaya Fdz-Herrero
Miguel Lorente
Dpto. de Física – Univ. de Oviedo
ayalo_olaya@eresmas.com
lorentemiguel@uniovi.es

PACS: 43.75 - Zz

Resumen:

En este trabajo estudiaremos, de forma experimental, la consonancia y disonancia que se producen en los distintos intervalos que se pueden formar entre dos sonidos: partiendo del unísono se mantiene uno fijo, se mueve el otro cromáticamente hasta llegar a la octava. De esta forma se comprobará si los cálculos teóricos y estadísticos realizados hasta ahora son ciertos y si nuestros resultados se asemejan a ellos. Los sonidos serán emitidos por dos instrumentos no temperados, el violín y el clarinete; y por uno temperado, el órgano de tubos.

Abstract:

In this paper we are going to work, experimentally, about the consonance and dissonance between different sounds. We are going to prove, if the theoretical and statistical experiments are true. We use a violin, clarinet and pipe organ for the emission of the sounds.

Introducción:

El estudio de la consonancia y disonancia musical ha preocupado tanto a músicos, como a físicos y es un tema obligado en el campo de la psicoacústica. En la Grecia clásica ya se estudiaban las proporciones sencillas entre los sonidos como criterio de consonancia. Más recientemente, a mediados del s.XIX surge la teoría de los batidos, como fundamento físico del fenómeno y de la clasificación de la consonancia y disonancia (Helmholtz, 1863)¹.

En la mayoría de los casos, este tema ha sido estudiado desde un punto de vista teórico o estadístico (Plomp y Levelt, 1965). Se emiten una serie de sonidos sinusoidales puros (sin armónicos) de forma simultánea a un colectivo de oyentes (con formación musical o sin ella) y se les pide que, respecto a una muestra dada, respondan qué grado de disonancia perciben dentro de una escala de valores. A partir de estos resultados se elabora una gráfica en la que se representa la diferencia de frecuencia entre los dos sonidos sinusoidales (con la anchura de banda crítica como unidad) frente a la disonancia (que tiene una escala arbitraria) (Fig.1).

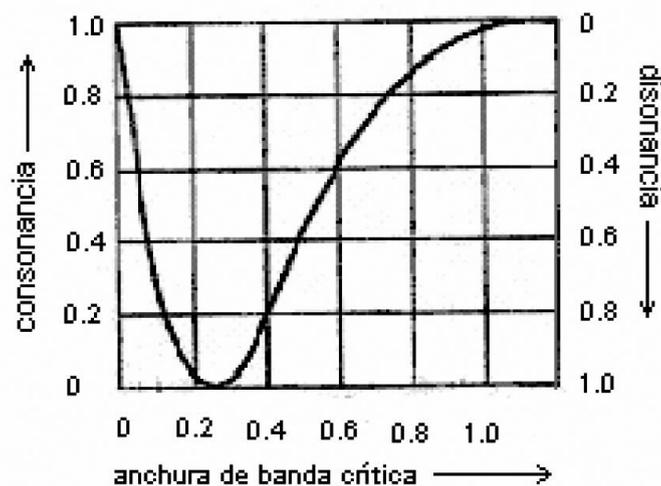


Figura 1. Curva de consonancia (Plomp y Levelt, 1965).

¹ Se puede ver una exposición detallada de esta teoría en Merino de la Fuente, 2001.

Con los datos obtenidos de esta gráfica, Plomp y Levelt (1965) elaboran otra de forma numérica en la que se representa la diferencia entre dos sonidos complejos frente a la disonancia. Dejando un sonido fijo (250Hz) varían el segundo desde el unísono hasta su octava. La disonancia que se produce entre los sonidos complejos, formados por los 6 primeros armónicos, se obtiene formando pares entre las frecuencias próximas de los diferentes armónicos que se encuentran dentro del ancho de banda crítica correspondiente a este rango (Fig. 2).

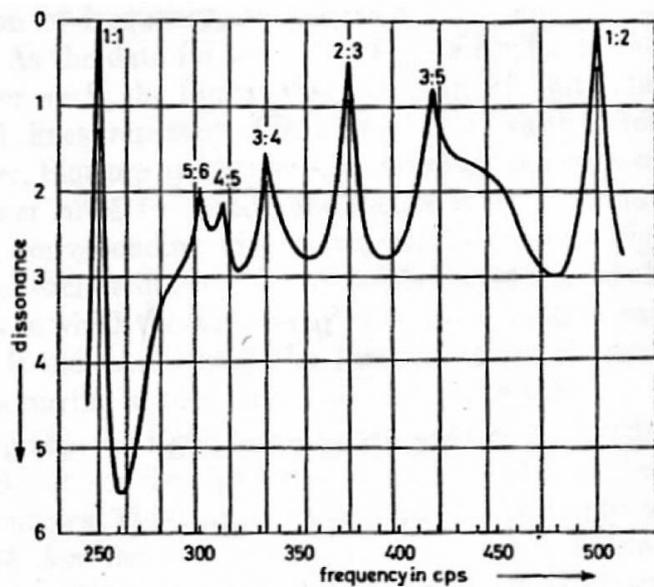


Figura 2. Disonancia frente a relaciones de frecuencia de dos sonidos simultáneos. Plomp y levelt 1965.

Uno de los autores (Lorente, 1964), señaló la importancia de la banda crítica para limitar los batidos disonantes.

Terhardt (1974) revisa las teorías de Helmholtz y basándose en ellas propone un interesante acercamiento a la consonancia musical. Para él, uno de los aspectos generales de la percepción de los sonidos es la diferencia entre *spectral-pitch* y *virtual-pitch*. El tono de un sonido puro, por ejemplo, es un *spectral-pitch*, mientras que el tono de un sonido complejo es un *virtual-pitch*. Hay por tanto dos modos de percepción del sonido: un modo analítico, resultado del *spectral-pitch* y otro sintético, resultado del *virtual-pitch*. La diferencia entre ambos es que el *virtual-pitch* puede ser generado solo si hay un proceso de aprendizaje previo

Objetivos:

En nuestro trabajo analizaremos la consonancia y disonancia entre todos los intervalos que se pueden producir dentro de una octava, i.e., partiendo del unísono, mantenemos uno de los dos sonidos fijos y el otro va ascendiendo de forma cromática hasta llegar a la octava a través de los siguientes

intervalos medidos en relaciones de frecuencia: 1:1, 15:16, 8:9, 5:6, 4:5, 3:4, 5:7, 2:3, 5:8, 3:5, 4:7, 8:15, 1:2.

Luego compararemos nuestros resultados experimentales con los obtenidos por Plomp y Levelt (1965) de forma numérica (Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10).

Es por tanto, una comprobación experimental de los cálculos teóricos realizados hasta ahora. (Para una revisión actual del tema ver Roederer, 1995)

Experimento:

Para llevar a cabo el experimento grabamos una serie de sonidos producidos por el violín en un ordenador y mediante un sonómetro integrador de precisión (Symphonie, 01dB, MVI Technologies Group) obtuvimos el espectro.

Por un lado, hicimos medidas muy precisas para ver dónde estaban exactamente los armónicos y luego utilizamos un poder separador semejante (en la medida de lo posible) al del oído humano para compararlas con las respuestas sensoriales. En concreto, hemos utilizado un poder separador equivalente a un 50% de la anchura de banda crítica, ya que en esa región el grado de disonancia es apreciable. (Fig. 1)

Partimos de un D_4 al unísono con otro D_4 , solamente que uno en cada cuerda, de forma que uno de ellos va con la cuerda al aire y el otro con la cuerda pisada. Desde ahí, vamos ampliando el intervalo cromáticamente hasta llegar a la 8ª, pero procurando que las relaciones de frecuencia sean sencillas en vez de las temperadas. Por ejemplo, en el caso de la tercera mayor, se afina una tercera armónica en lugar de una melódica. Los instrumentistas que pueden modificar la afinación de su instrumento durante la ejecución afinan de forma diferente si buscan una afinación armónica o melódica, i.e., si buscan que “suene bien” como acorde (al tocar en conjuntos de cámara) o que “suene bien” como melodía. Podríamos decir que la tercera melódica sería temperada (una relación 81:64), mientras que la tercera armónica sería sencilla o justa (una relación 5:4) (su frecuencia quedaría más baja, que la primera). Lo mismo podríamos decir del tritono melódico (45:32) o justo (7:5)

Por un lado mostramos un espectro fino (con una anchura de banda pequeña) (Fig.3), que nos permite observar todos los armónicos bien diferenciados. Por otro, mostramos un espectro con anchura de banda de 50 Hz semejante a 50% de la anchura de banda crítica (Fig. 4), para ver los armónicos que se han fusionado en el analizador y suponemos también en el oído humano. Esta nueva frecuencia de fusión será la semisuma de las frecuencias de los armónicos y tendrá una frecuencia de batido igual a la diferencia de ambas.

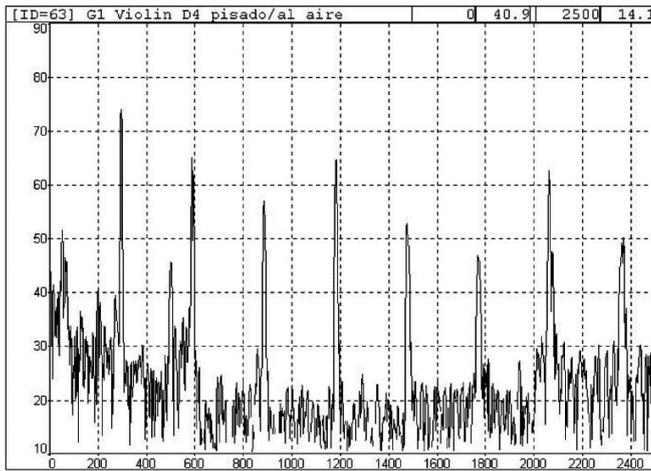


Figura 3. Espectro D_4D_4 (ancho de banda 1.569 Hz).

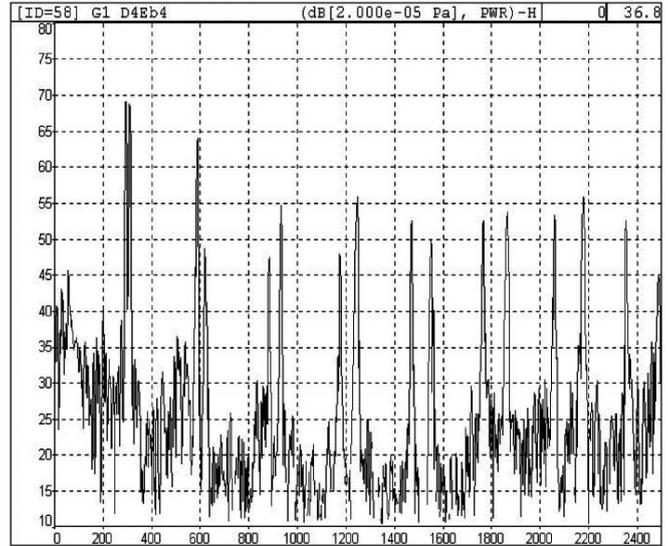


Figura 5. Espectro D_4Eb_4 (ancho de banda 1.569 Hz).

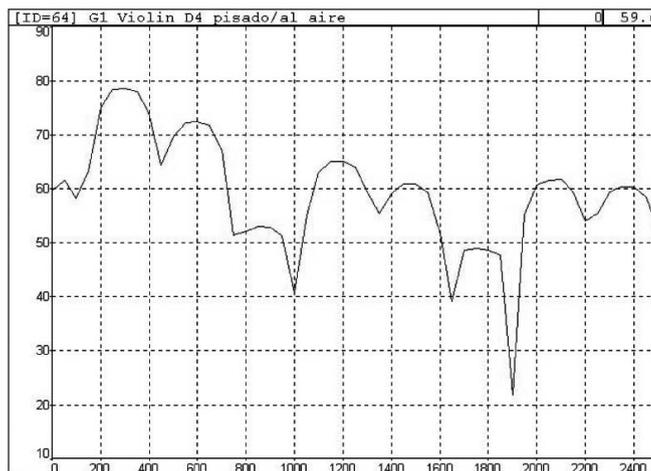


Figura 4. Espectro D_4D_4 (ancho de banda 50 Hz).

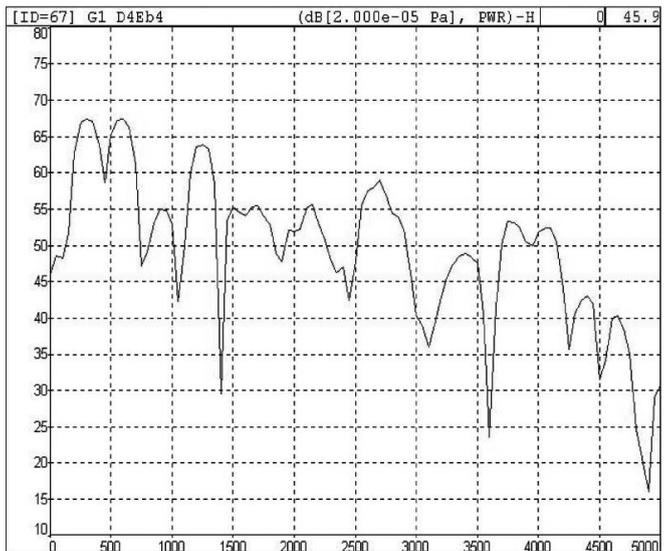


Figura 6. Espectro D_4Eb_4 (ancho de banda 50 Hz).

Observamos el mismo número de máximos de intensidad para ambas gráficas (Fig.3 y 4), lo que nos indica que ningún armónico se ha fusionado.

El espectro fino es equivalente a mostrar simultáneamente lo que el oído recogería para cada sonido por separado, unos máximos corresponden a uno de los sonidos y los otros al otro (en este caso coinciden los máximos de ambos sonidos). En el espectro ancho lo que suponemos es lo que el oído percibe realmente al oír ambos sonidos simultáneamente. Como no se ha fusionado ningún máximo es un sonido sin batidos disonantes, aunque debido a la afinación no perfecta se pueden dar batidos lentos que son consonantes.

En las Fig.5 y 6 mostramos los espectros correspondientes al intervalo D_4Eb_4 donde se observan fusiones de los armónicos próximos:

Para observar los batidos, representamos la intensidad del batido en función del tiempo². En la Fig.7, observamos todos los batidos que producen disonancia del acorde D_4Eb_4 . La frecuencia de batido la calculamos midiendo el tiempo que tarda el armónico resultante que produce ese batido en realizar una oscilación y luego calculamos su inverso (ya que la frecuencia es el inverso del período).

² Agradecemos a la profesora María Vélez esta forma gráfica de visualizar los batidos.

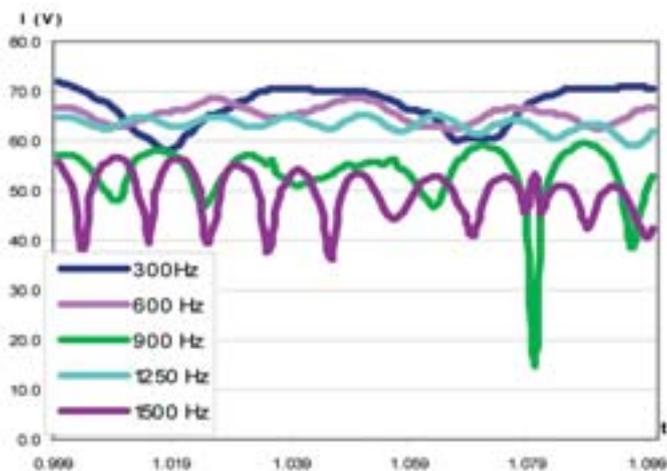


Figura 7. Batidos del acorde D_4Eb_4 .

Vamos a ver la representación gráfica para otros dos intervalos menos disonantes: En primer lugar la 5ª Justa y luego la 3ª Mayor. En estos dos casos, a diferencia del anterior, observamos que hay frecuencias para las que la intensidad no varía con el tiempo, en estos casos no hay batidos. Como es el caso en la Fig.10 de la frecuencia de fusión 1750 Hz, o en la Fig.13, la frecuencia de fusión de 1500 Hz.

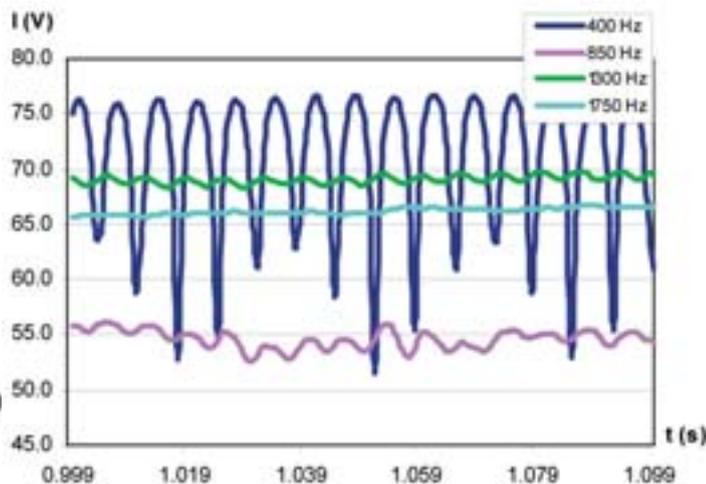


Figura 10. Batidos del acorde D_4A_4 .

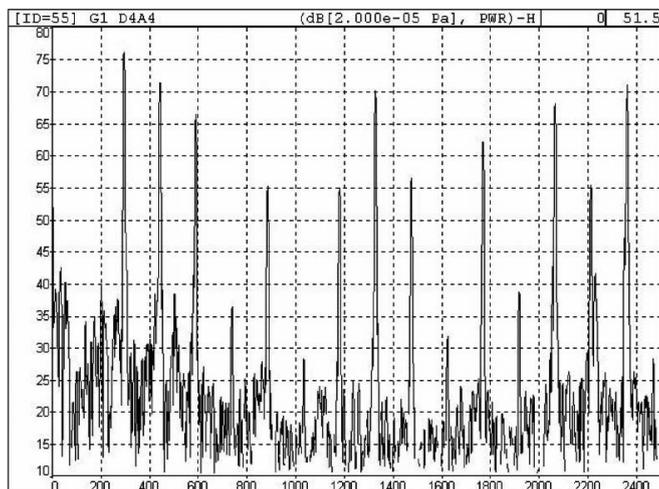


Figura 8. Espectro D_4A_4 (ancho de banda 1.569 Hz).

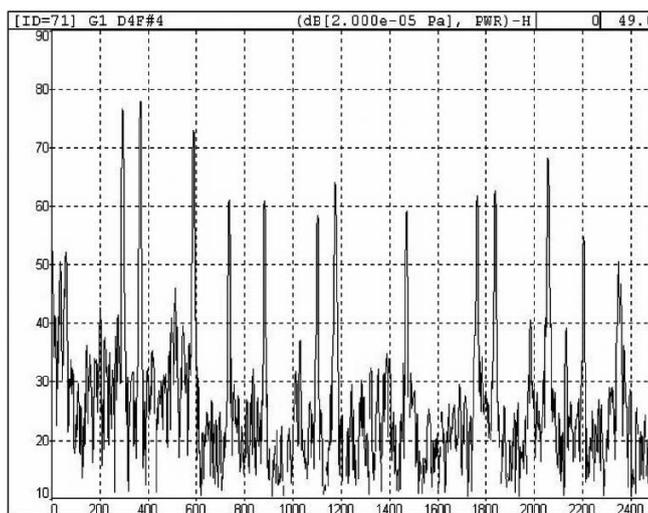


Figura 11. Espectro $D_4F\#_4$ (ancho de banda 1.569 Hz).

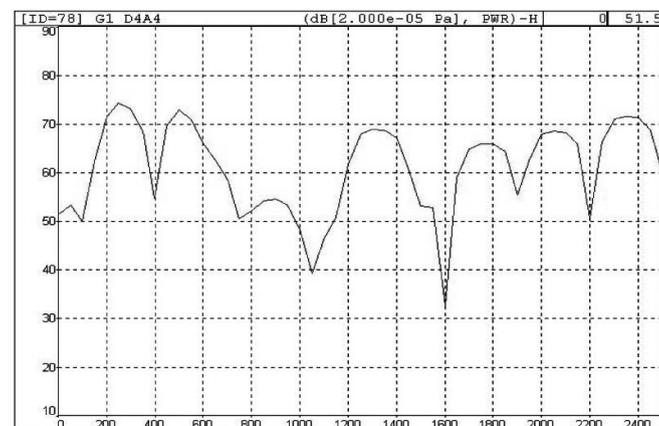


Figura 9. Espectro D_4A_4 (ancho de banda 50 Hz).

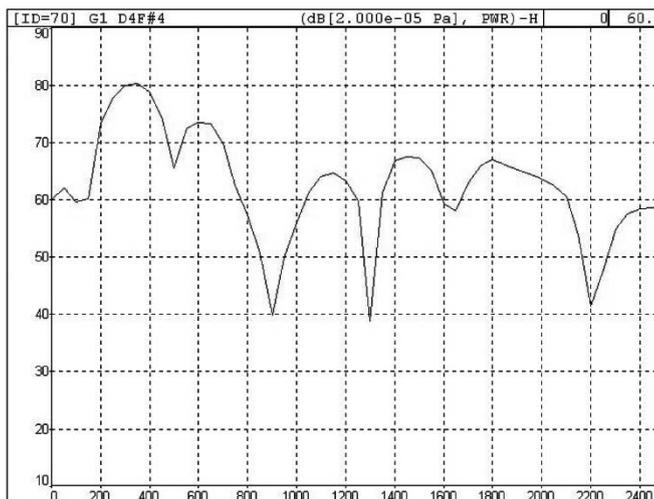


Figura 12. Espectro $D_4F\#_4$ (ancho de banda 50 Hz).

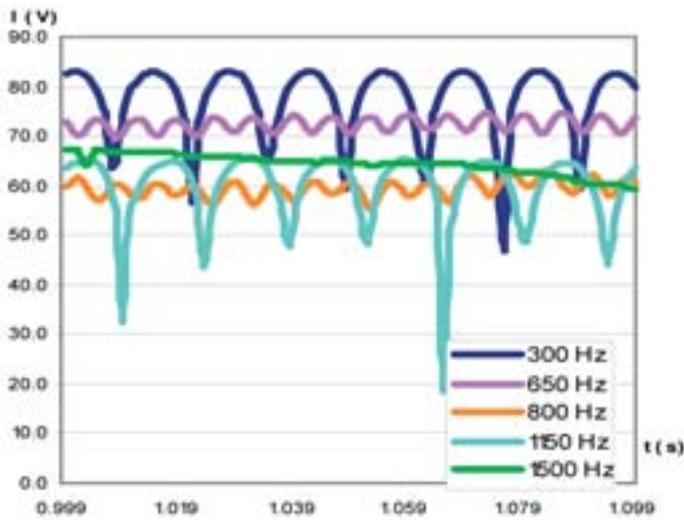


Figura 13. Batidos del acorde $D_4F\#_4$.

Para calcular la disonancia de cada acorde tendremos que sumar las disonancias de cada par de armónicos de dicho acorde, según explica Plomp (1965, p.555): “We assume that the total dissonance of such an interval is equal to the sum of the dissonances of each pair of adjacent partials”. Para calcular la disonancia primero calculamos la anchura de banda crítica correspondiente a cada frecuencia-fusión, miramos qué tanto por ciento de cada anchura de banda le corresponde a la frecuencia de batido y con la gráfica de Plomp (Fig.1), le asignamos el valor correspondiente de la disonancia. Los resultados están dibujados en la Fig. 14.

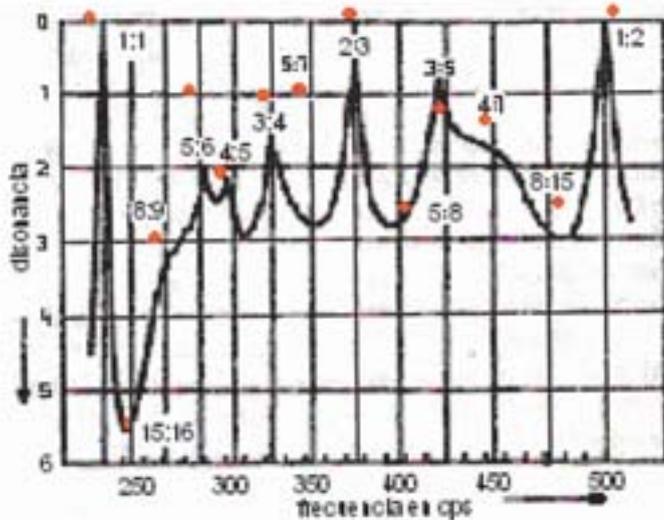


Figura 14. Comparación entre los resultados de Plomp y Levelt (1965) y nuestros resultados para el violín.

Los puntos rojos corresponden a nuestros resultados para el violín. No podemos hacer una gráfica continua, como Plomp y Levelt, ya que no barremos todo el rango de

frecuencias. Como vemos, se ajusta a los valores obtenidos por Plomp y Levelt (1965) de forma numérica. Ellos solo sacan resultados para relaciones de frecuencia en números naturales hasta el 6 (1:1, 5:6, 4:5, 3:4, 2:3, 3:5, 1:2) mientras que nosotros obtenemos resultados para relaciones de frecuencia con números mayores de 6 (15:16, 8:9, 5:7, 5:8, 4:7, 8:15); además sus sonidos son artificiales (construidos con 6 armónicos de igual intensidad), mientras que los nuestros son naturales y por eso tienen muchos más armónicos de intensidad variable.

Observamos también que las relaciones de frecuencia que coinciden con las que se muestran en la Fig.14, en nuestro caso son relaciones que corresponden a intervalos más consonantes que para Plomp y Levelt. Si bien en un principio se podría esperar que, al ser mayor el número de armónicos empleado por nosotros respecto de Plomp, el intervalo de nuestro experimento fuese más disonante (Kameoka y Kuriyagawa, 1969), hay una serie de factores que influyen en la disonancia, como por ejemplo la intensidad: al no tener todos los armónicos la misma intensidad, pueden enmascarse y modificar la disonancia. Como la intensidad de los armónicos que maneja Plomp es la misma, pueden producir mayores disonancias que los nuestros. También hay que tener en cuenta que el punto de mayor disonancia obtenido en nuestro experimento se ha hecho coincidir con el punto de mayor disonancia obtenido por Plomp y Levelt. En todo momento estamos trabajando con valores relativos; para poder establecer una comparación se ha tomado como referencia el valor más disonante y el menos disonante, comparando el resto en función de esa escala.

Hemos hecho lo mismo con el clarinete y con el órgano (Fig.14 y 15).

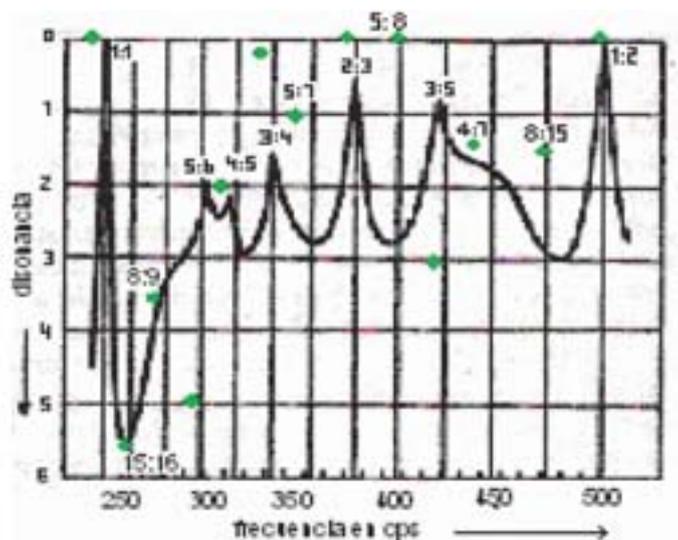


Figura 15. Comparación entre los resultados de Plomp y Levelt (1965) y nuestros resultados para el clarinete.

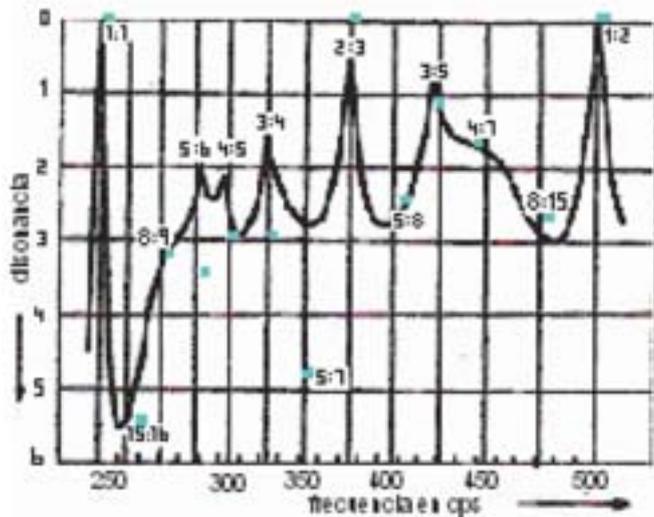


Figura 16. Comparación entre los resultados de Plomp y Levelt (1965) y nuestros resultados para el órgano de tubos.

Conclusiones:

Durante este experimento hemos realizado un análisis físico de un fenómeno musical llamado disonancia, que comprueba experimentalmente los estudios estadísticos o numéricos realizados.

En nuestras medidas hemos comprobado la teoría de los batidos de Helmholtz, ya que se cumple para los intervalos más empleados en música. También hemos visto que la gráfica que Plomp y Levelt (1965) obtuvieron para la disonancia de los distintos intervalos de forma numérica también se obtiene de forma experimental. En este caso, nuestros resultados difieren en ciertas ocasiones de los que ambos obtuvieron de forma numérica en 1965 por diversos motivos:

En primer lugar nosotros no podemos ofrecer una gráfica continua, ya que no barremos todo el rango de frecuencias entre 1:1 y 2:1 sino solamente todas las relaciones que se podrían producir en ese rango con un instrumento de sonidos fijos, i.e., los intervalos que se pueden producir en una escala cromática. Si bien hay que decir que tanto para el violín como para el clarinete, instrumentos que no tienen la afinación fija, hemos buscado que las relaciones de frecuencia fuesen lo más justas posibles, en cambio, en el caso del órgano (cuya afinación está fija) los intervalos son temperados.

Por otro lado nosotros utilizamos sonidos naturales (obtenidos directamente de instrumentos musicales tocados por músicos), en consecuencia, con todos sus armónicos; en el caso de Plomp y Levelt los sonidos eran artificiales y por tanto podían controlar el número de armónicos reduciéndolo a 6.

Un experimento añadido ha sido utilizar acordes de tres sonidos. Aunque no hemos obtenido resultados cuantitativos respecto de la disonancia, hemos obtenido resultados cualitativos de un comportamiento diferente. Se siguen produciendo batidos cuando hay armónicos dentro de la anchura de banda crítica, pero en este caso pueden quedar dentro de dicha anchura de banda más de dos armónicos, lo que produce irregularidades en la oscilación de los batidos. Este tema, que desborda el método experimental que hemos descrito, está siendo investigado con nuevos planteamientos.

Bibliografía:

- Békésy, G. (1960) "Experiments in hearing". McGraw-Hill. N.Y.
- Fdez. de la Gándara, G y Lorente, M. (1998) "Acústica musical". ICCMU. 2ª Edición
- Helmholtz, H (1863) "Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik", Verlag F. Vieweg & Sohn, Braunschweig
- Helmholtz, H. (1954) "On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music" Dover Publications. New York
- Kameoka, A. & Kuriyagawa, M (1969). "Consonance theory: Consonance of complex tones and its calculation method." J. Acoust. Soc. Am, Vol.45, No6, pp. 1460-1469
- Lorente, M. (1964) "Contribución al estudio de la acústica musical: fundamentos físicos de la tonalidad y de la consonancia." Revista de Ciencia Aplicada. Nº97, pp. 97-116
- Merino de la Fuente, J.M.(2001) "Concepto moderno de la consonancia musical". Revista de Acústica Vol. XXXII nº 1 y 2, pp.1-4
- Plomp, R. & Levelt, W.J.M. (1965). "Tonal consonance and critical bandwidth" J.Acoust. Soc. Am, Vol. 38, pp. 883-884
- Plomp, R (1967). "Beats of mistuned consonances." J. Acoust. Soc. Am, Vol.42, pp 462-474
- Roederer, J.G. (1995), "The Physics and Psychophysics of Music", Springer, Berlin.
- Terhardt, E (1974) "Pitch, consonance and harmony" J.Acoust. Soc. Am. 55, pp 1061-1069

Grupo

AUDIOTEC

Ingeniería y Control del Ruido



NUEVO CENTRO DE ACÚSTICA EN ESPAÑA

- ENSAYO DE MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN CÁMARAS ACÚSTICAS NORMALIZADAS

Ensayos de aislamiento acústico de cerramientos verticales (tabiques, trasdosados, puertas, ventanas, etc.)

Ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo y de impacto de cerramientos horizontales

Ensayos de mejora de suelos a ruido de impacto

Ensayos de coeficientes de absorción de materiales acústicos (Cámara reverberante)

- ASESORÍA Y CONSULTORÍA ACÚSTICA

- MEDICIONES ACÚSTICAS "IN SITU", acreditadas ENAC de:

Inmisión de ruido en viviendas. Ruido medioambiental. Aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales. Aislamiento acústico a ruido de impacto. Aislamiento acústico de fachadas.

Tiempo de reverberación. Ruido en puestos de trabajo. Potencia sonora de maquinaria.

- ENTIDAD DE INSPECCIÓN, acreditada ENAC en ruidos y vibraciones

- ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE IMPACTO ACÚSTICO

- DESARROLLO PROYECTOS DE I+D+i

- PERITACIONES ACÚSTICAS

- MAPAS DE RUIDO



Telf.: 983 361 326

Fax: 983 361 327

E-mail: info@audiotec.es

Web: www.audiotec.es

Ctra. Burgos-Portugal Km.116
Apdo. Correos 490
47080 - VALLADOLID
ESPAÑA

Centro de Acústica AUDIOTEC
Parque Tecnológico de Boecillo, Parc. 28 - 30
Apdo. Correos 490
47080 - VALLADOLID
ESPAÑA

