



¿Qué es el sonido?

- Es una vibración del aire (el medio propagador) que puede ser detectada por nuestros nervios auditivos (el receptor). Siempre necesita un medio material vibrante (el emisor) que “empuje” el aire circundante para producir el sonido.
- En el aire en condiciones normales de temperatura y presión, el sonido se propaga a 340 m/s.



soundWaveElephant4.swf



5-14 - Science animations - Sound waves in gas.swf



5-14 - Science of sound - Pulse of sound.swf



TravelWaves.swf

Características de un sonido “puro”:

- 1) *Amplitud*. Es el máximo desplazamiento de la vibración y determina la intensidad (el volumen) del sonido.
- 2) *Frecuencia*. Es el número de vibraciones por segundo de las moléculas del aire y en música determina la nota o el tono del sonido. Un “sonido” con menos de 20 vibraciones por segundo no es registrado por el oído humano (infrasonido). Tampoco lo es un sonido con más de 20.000 vibraciones por segundo (ultrasonido)

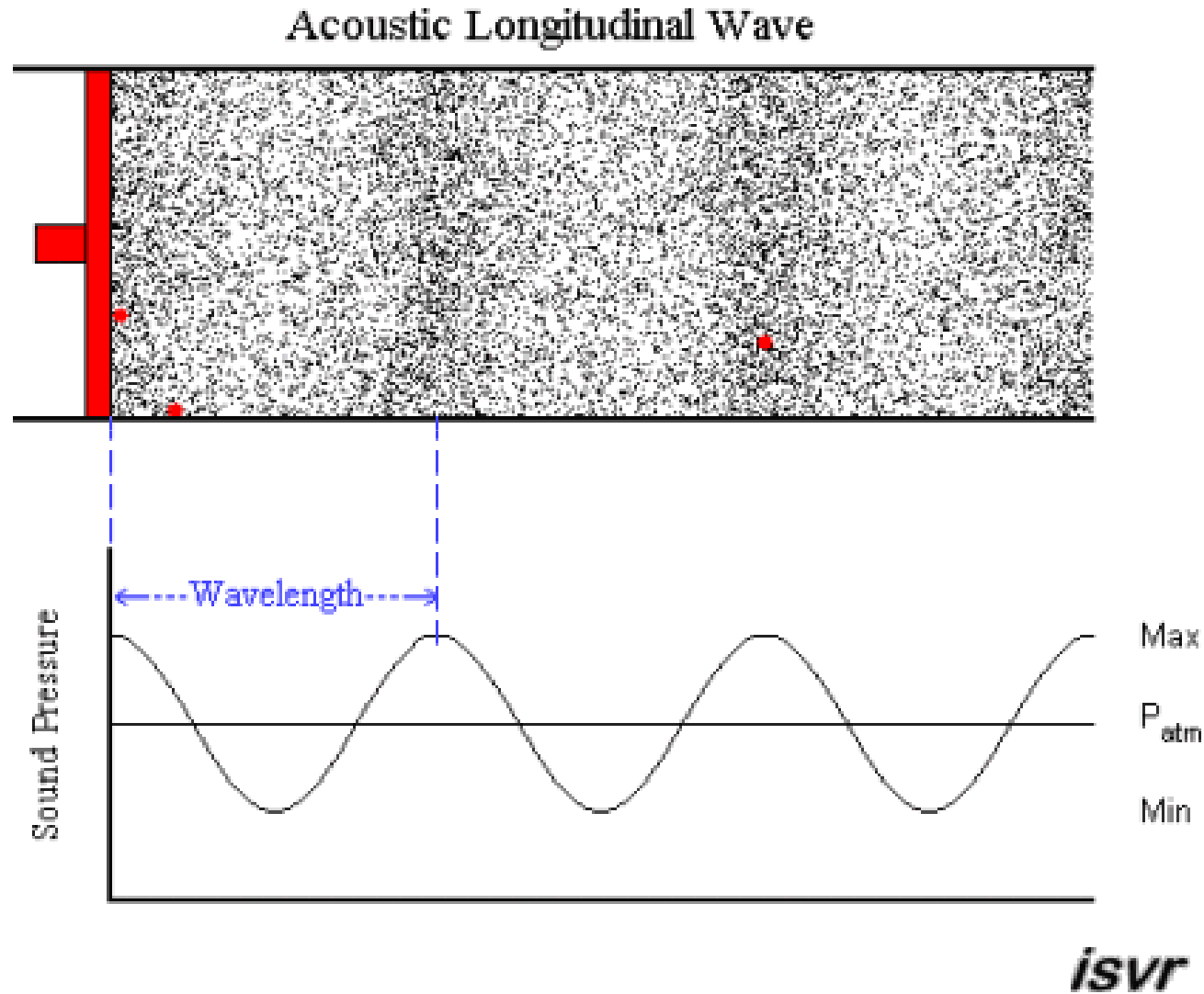


long_wave.swf

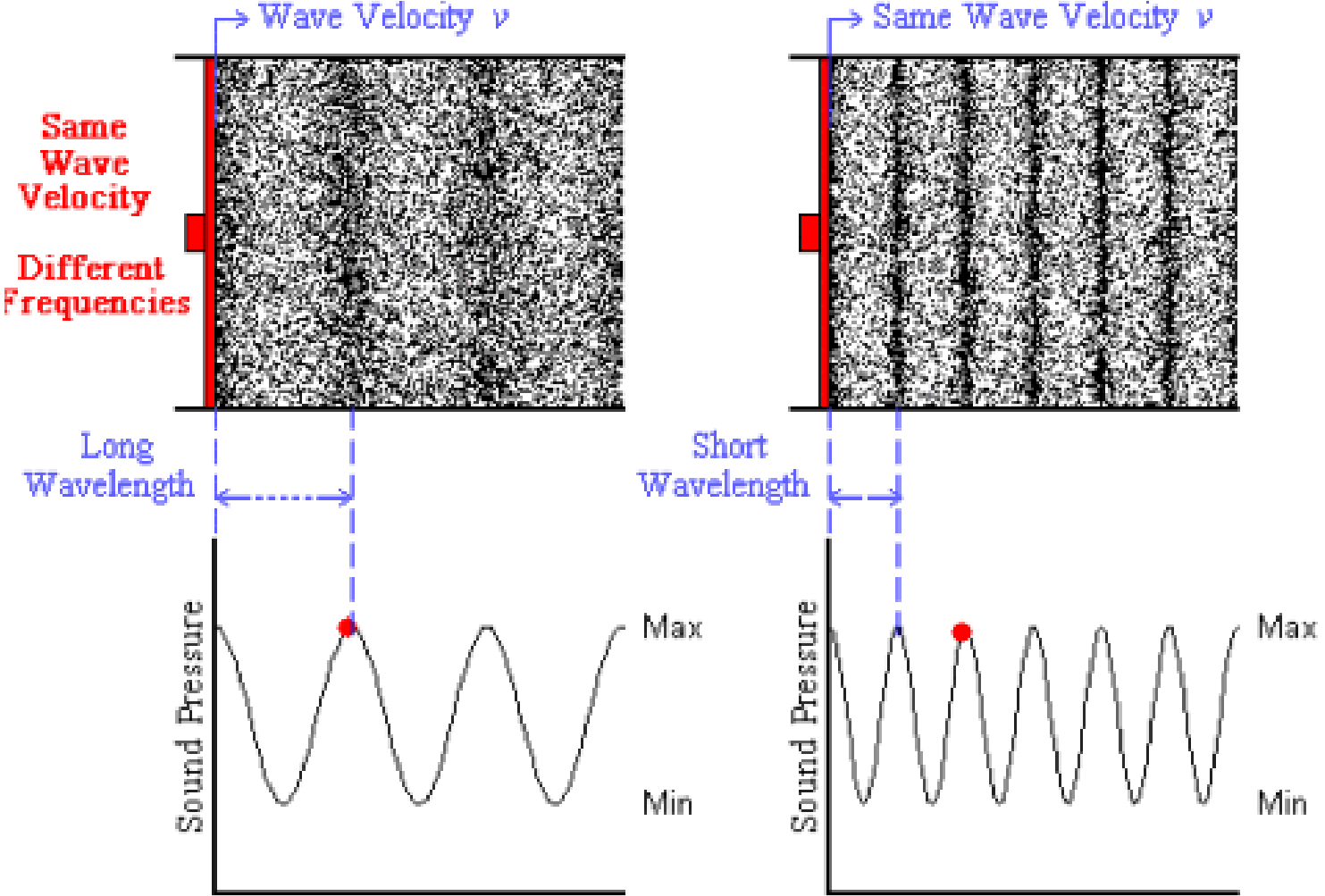


5-14 - Science animations - Oscilloscope.swf

3) *Longitud de onda*. Es la mínima distancia entre dos partículas que tienen exactamente el mismo desplazamiento en un instante dado.



La longitud de onda y la frecuencia están relacionadas:



isvr

La intensidad sonora

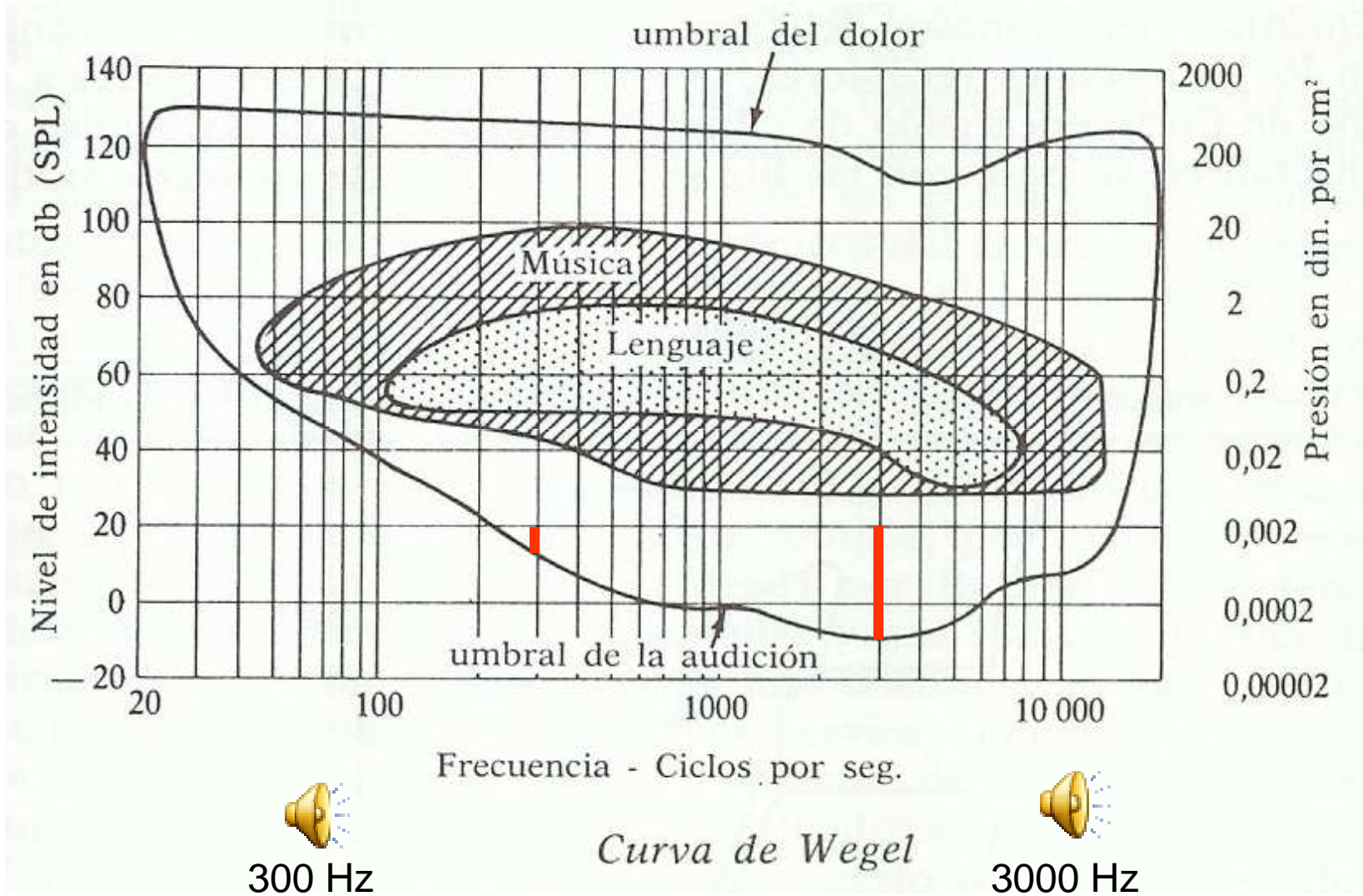
$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Energía incidente}}{\text{Tiempo} \cdot \text{Área}}$$

Umbral auditivo (oído medio) a la frecuencia de 1000 Hz: $I_0 \sim 10^{-12}$ watts/m²

$$\text{Intensidad sonora en decibeles: dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

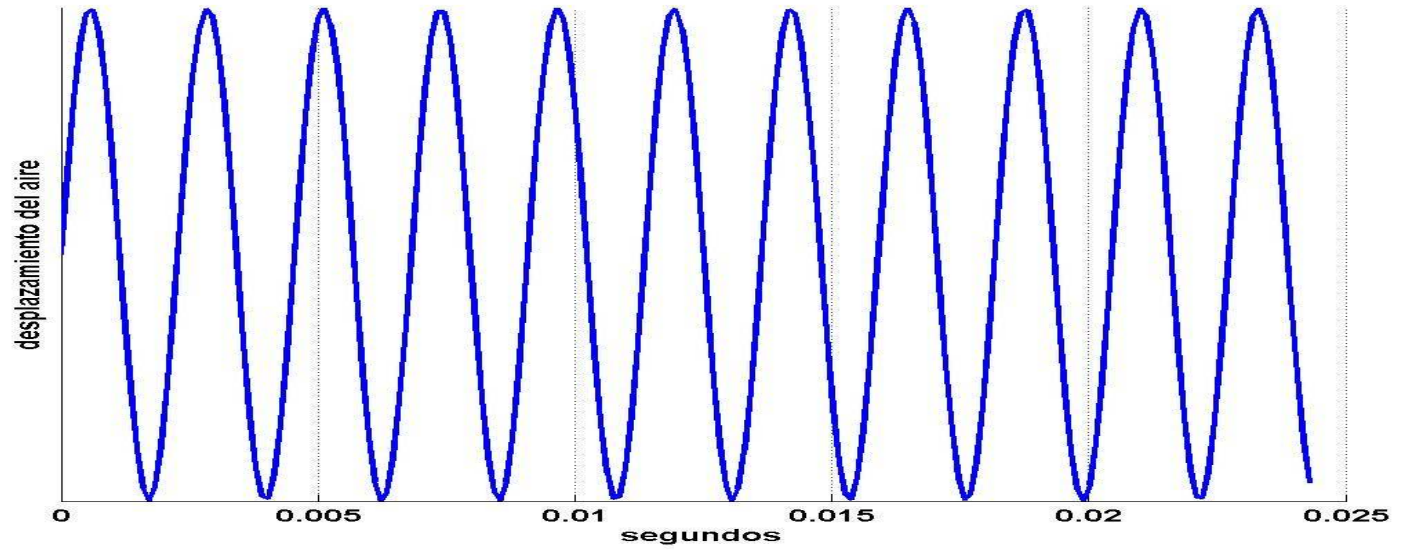
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Grupo de rock
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de Gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Ruido del campo
0 dB	Umbral de la audición

La sensibilidad del oído humano para diferentes frecuencias





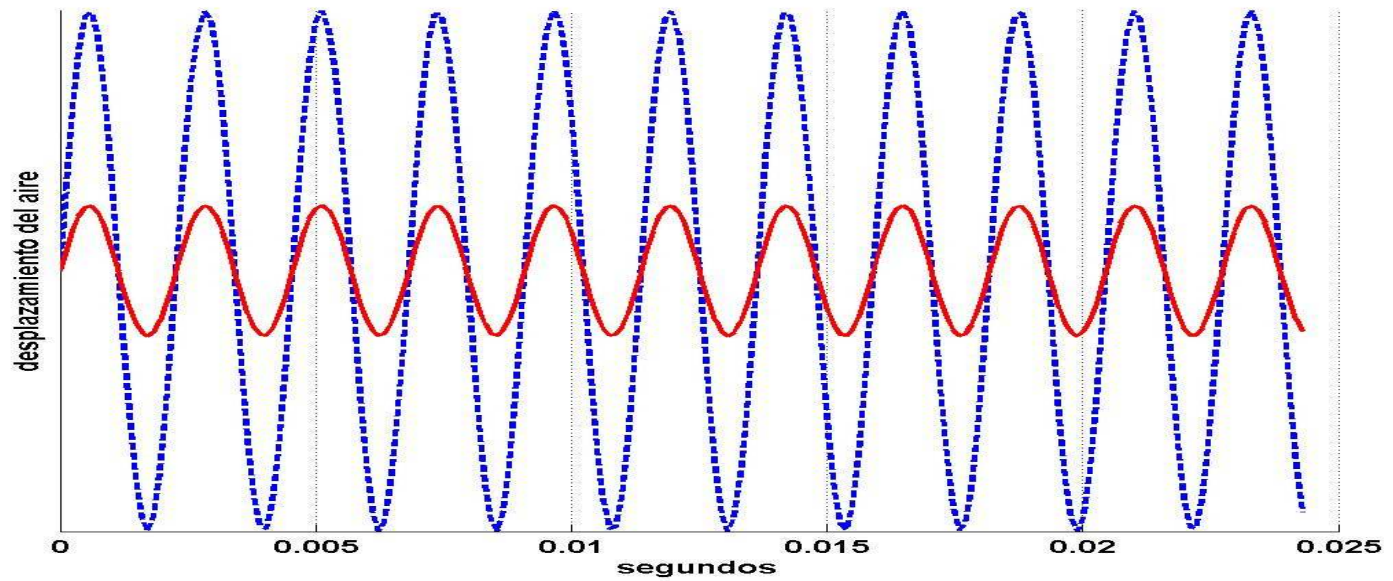
La 4



Frecuencia = 440 vib/seg = 440 Hz



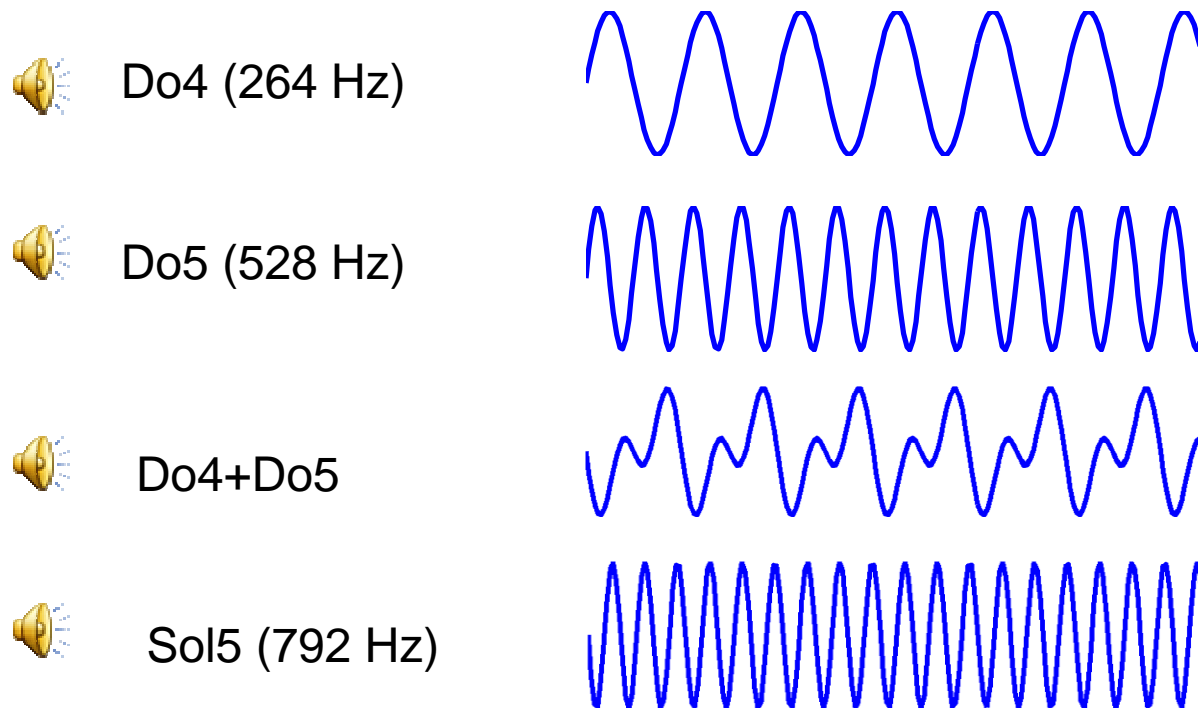
(1/4)La 4



Si el La4 (440 Hz) del diapasón tiene el sonido escuchado, ¿por qué el La4 de todos los instrumentos musicales no suena igual al diapasón?

- Porque los sonidos de la naturaleza (y de los instrumentos musicales) no es “puro”. Es decir, está compuesto de una suma de sonidos “puros” con diferentes frecuencias. Las diferentes amplitudes de estos sonidos “puros” hace la diferencia entre los distintos instrumentos musicales.

Proceso de síntesis de un sonido “natural”

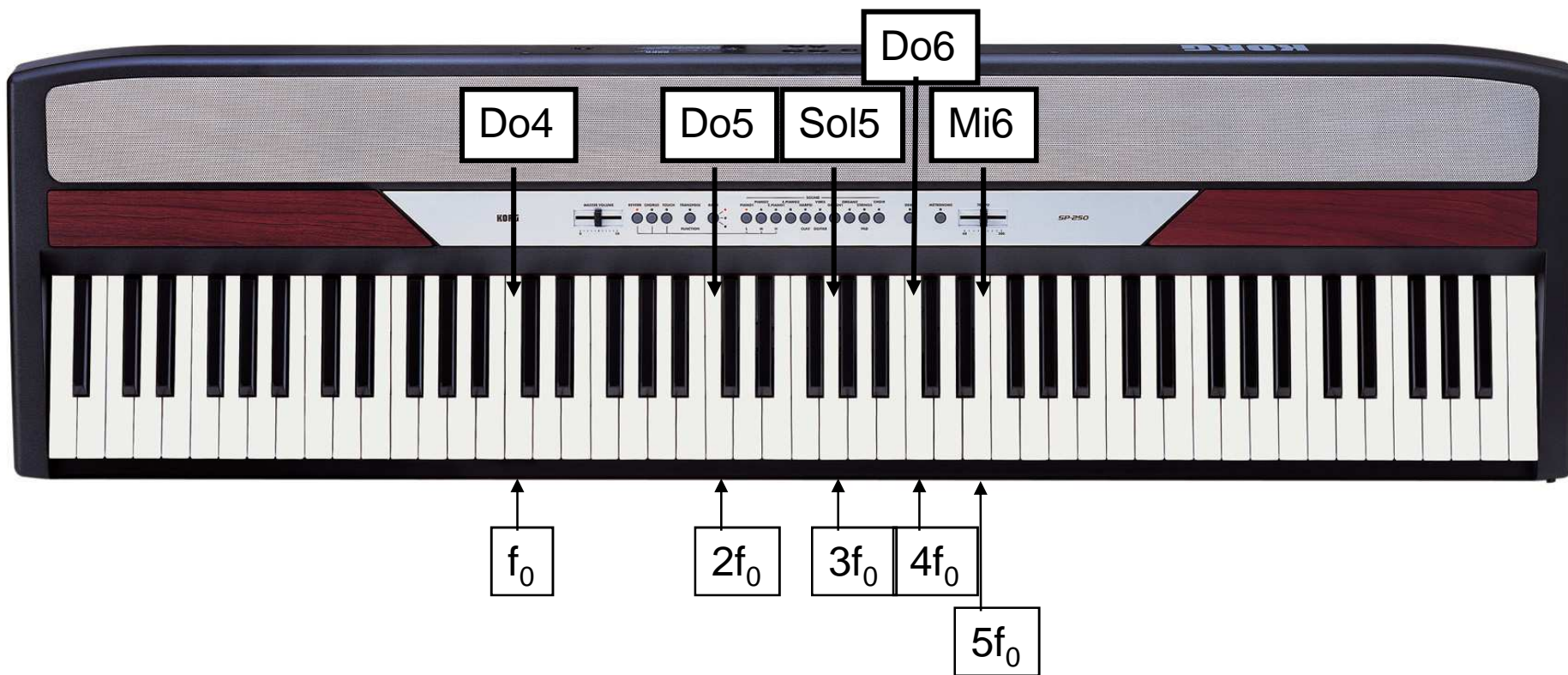




Do4+Do5+Sol5

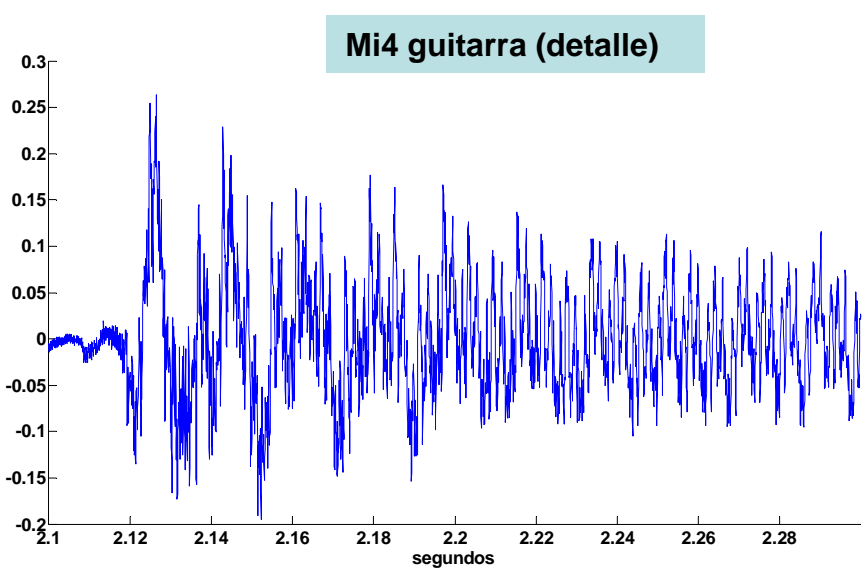
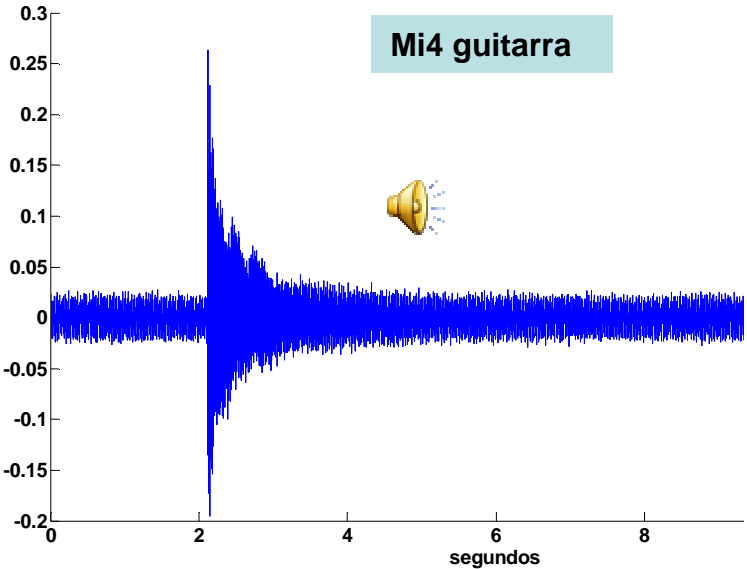
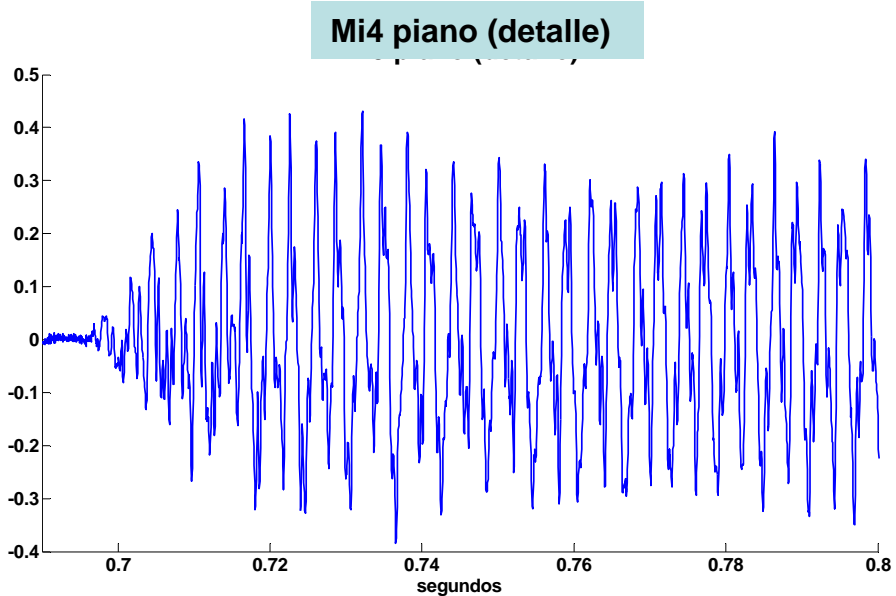
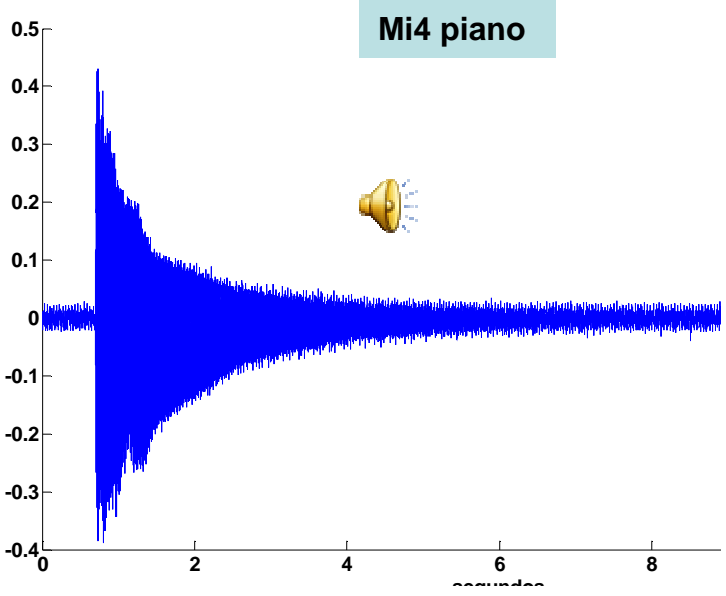


Do4+Do5+Sol5+Do6+Mi6



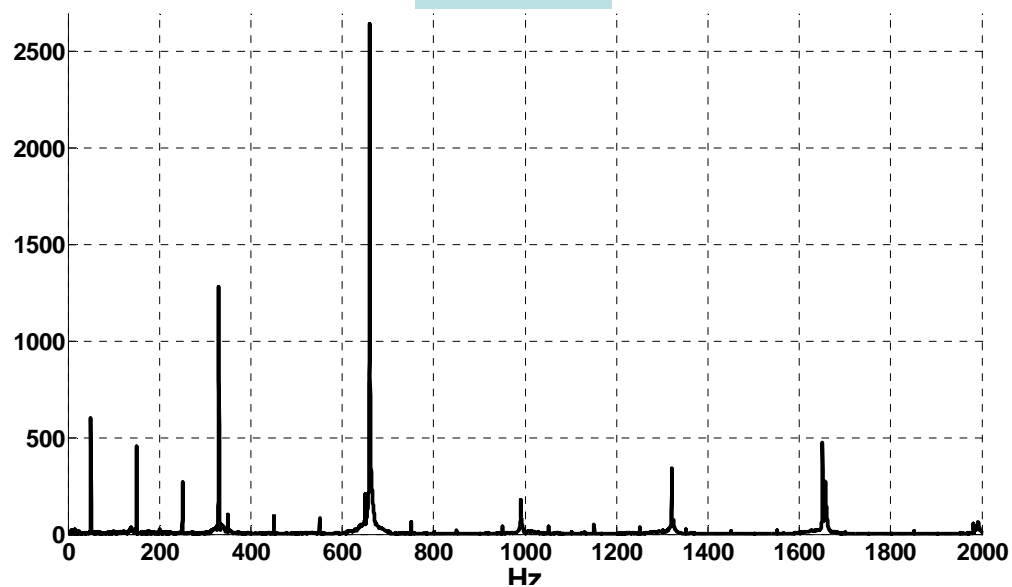
$f_0 = 264 \text{ Hz (Do3)}$

La misma nota (Mi4) ejecutada por un piano y por una guitarra.

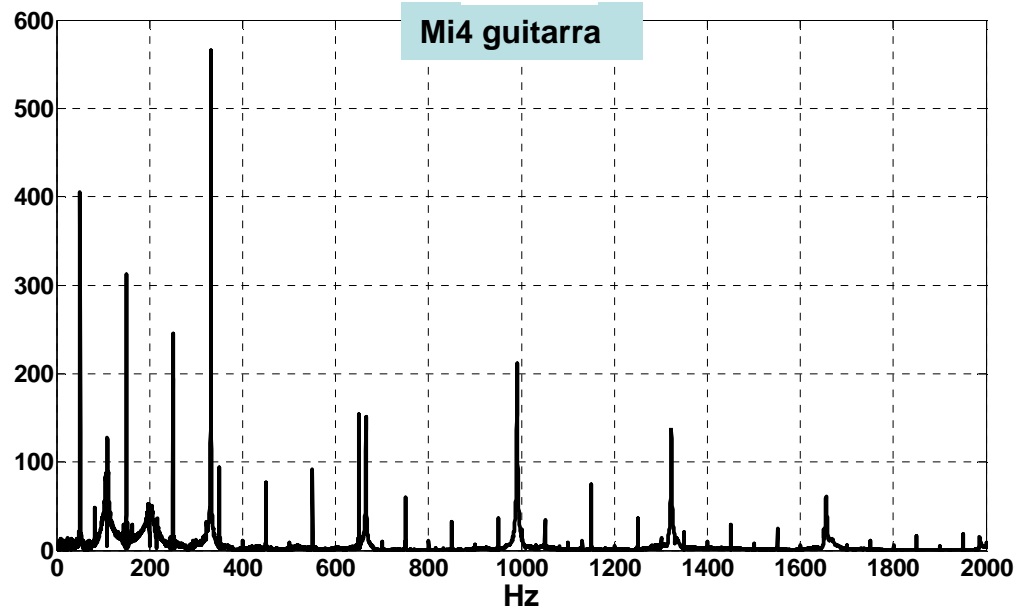


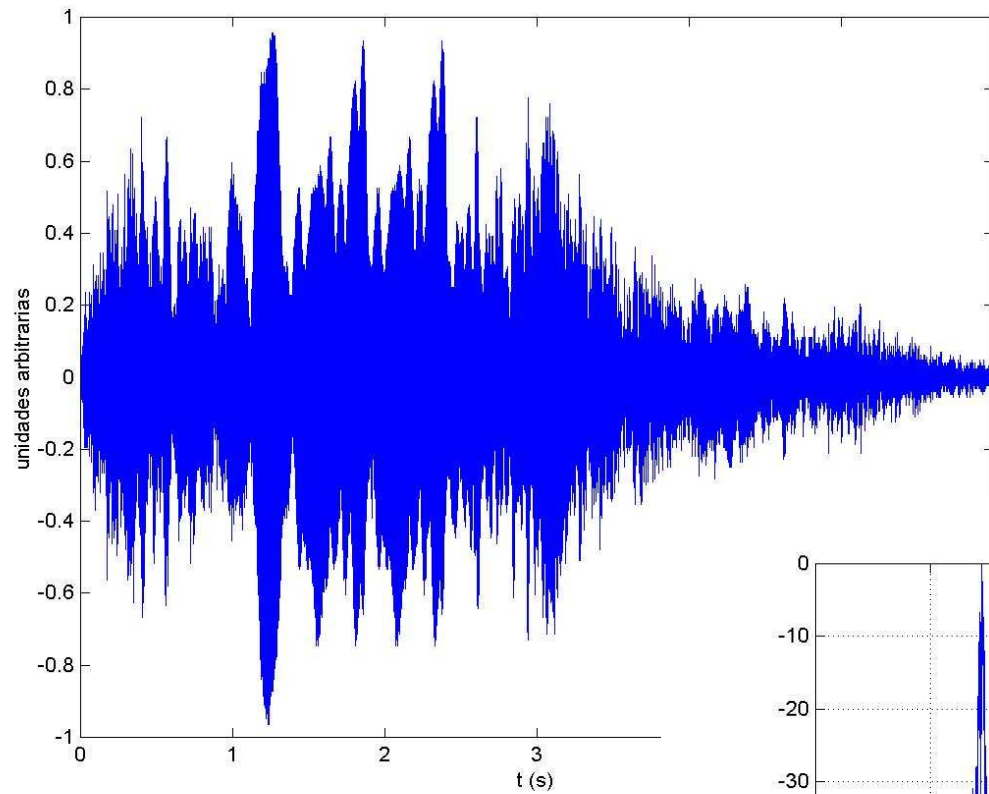
El “espectro” o análisis de Fourier de un sonido

Mi4 piano

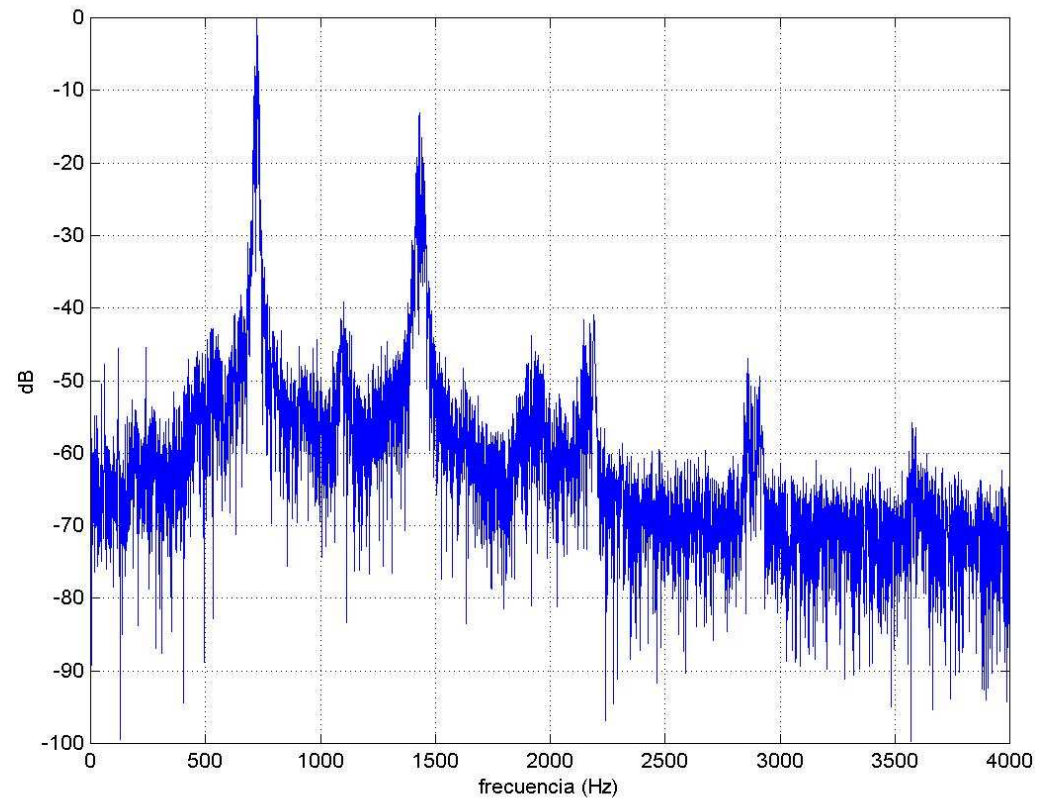


Mi4 guitarra





lobo



La importancia de conocer el “análisis de Fourier” de un sonido:

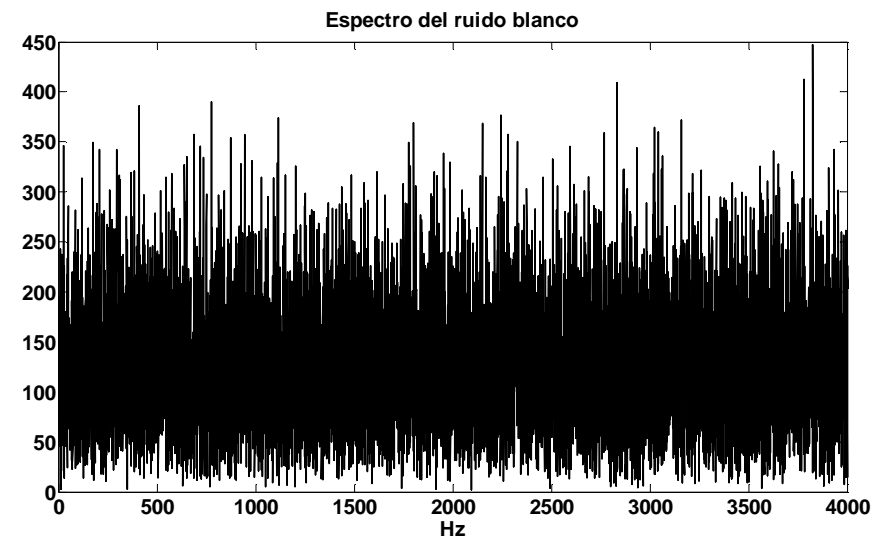
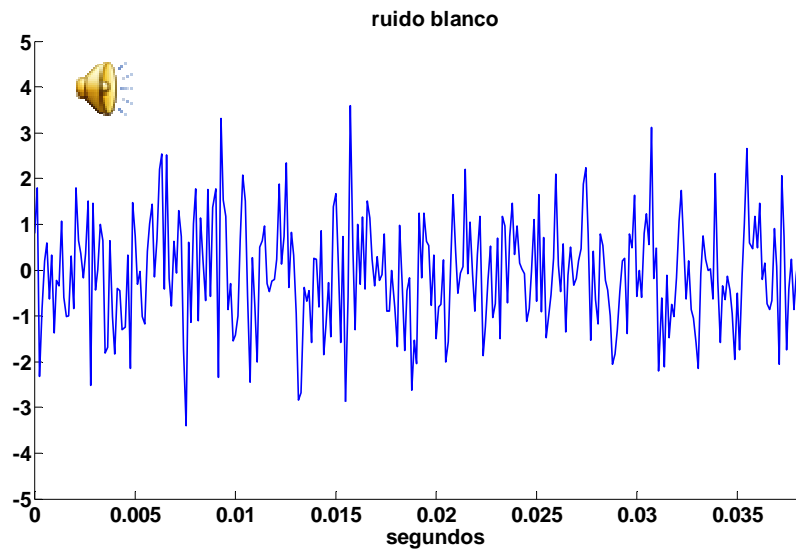
- 1) Permite filtrarlo, eliminando frecuencias indeseadas
- 2) Permite sintetizar sonido, hasta el límite de la tecnología
- 3) Permite el “reconocimiento de voz”



Sonidos varios:

5-14 - Science of sound - Wave envelopes.swf

El ruido “perfecto”

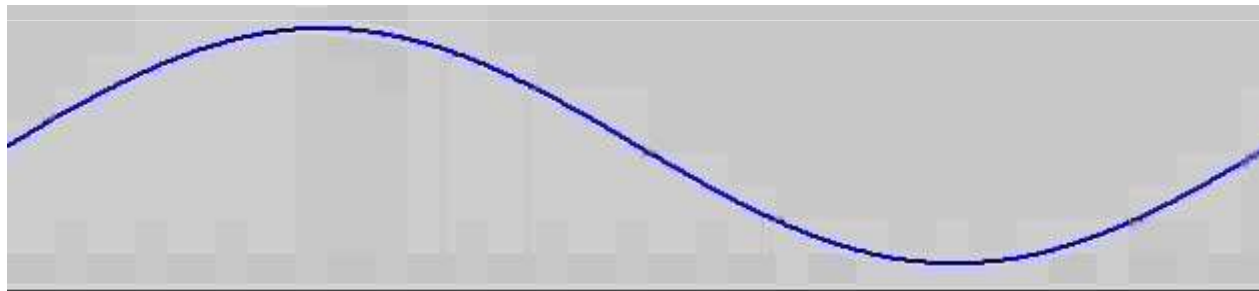


Los instrumentos musicales

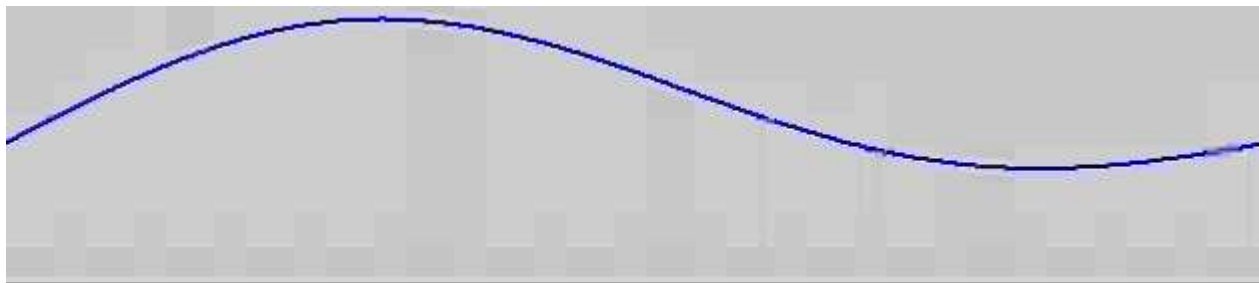
Las cuerdas



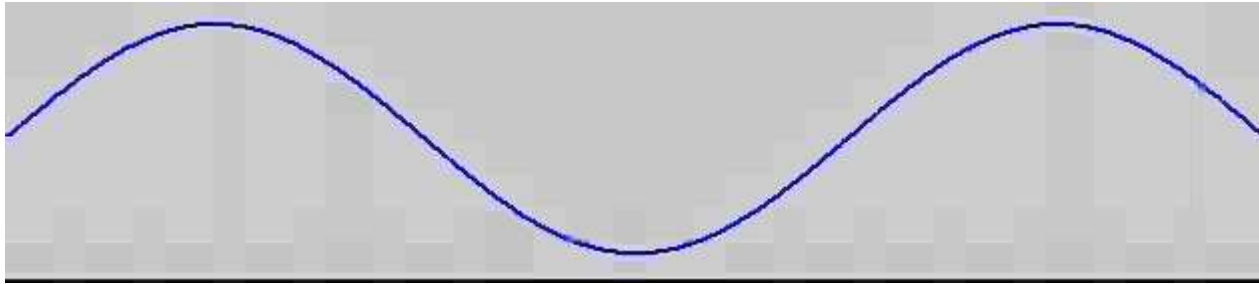
Modo 1
Frecuencia f_0



Modo 2
Frecuencia $2f_0$



Modos 1+2



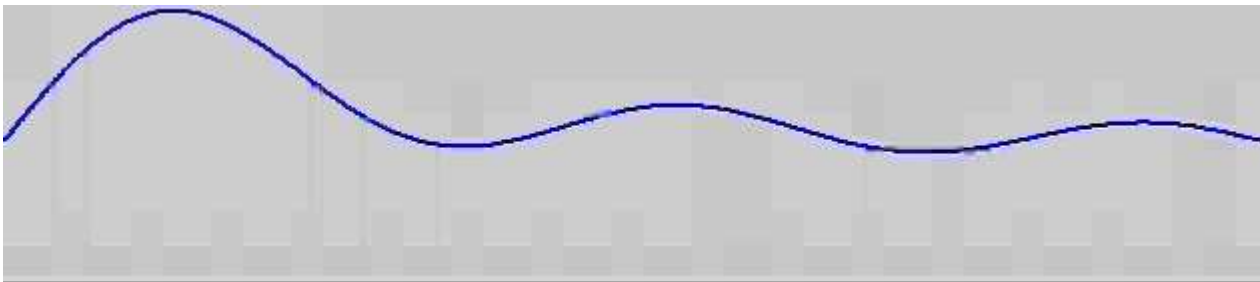
Modo 3
Frecuencia $3f_0$



Modos 1+2+3



Modo 4
Frecuencia $4f_0$



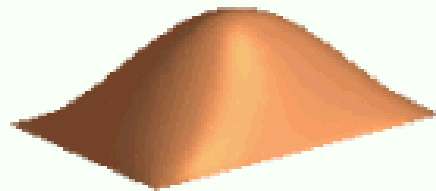
Modos 1+2+3+4+5

Tambores y tamboriles

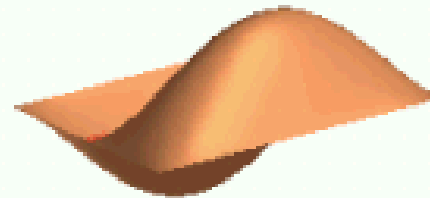
Tambores y tamboriles

Modos de vibración de membranas

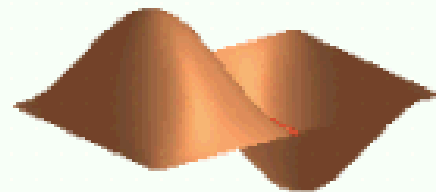
Mode (1,1)



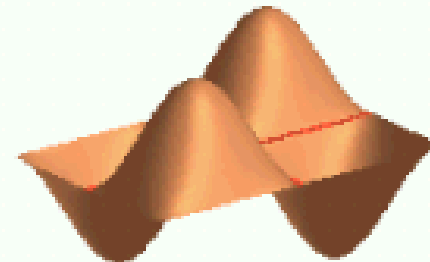
Mode (1,2)

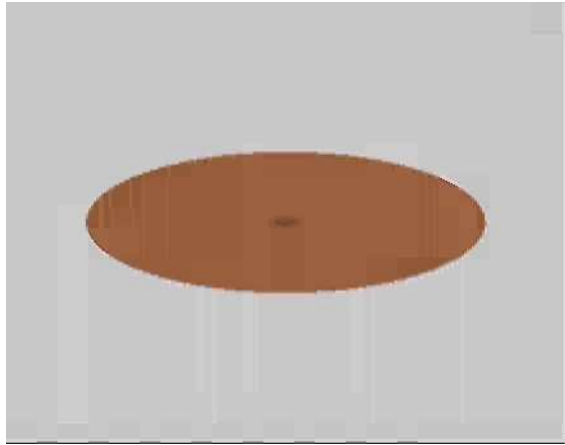


Mode (2,1)

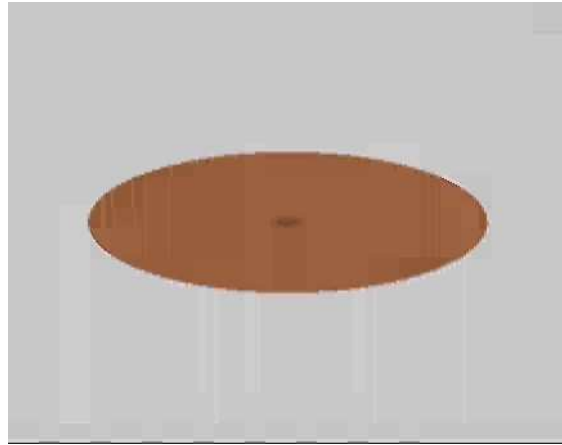


Mode (2,2)

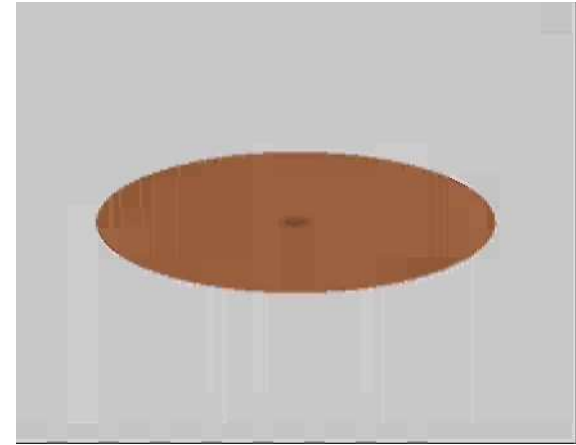




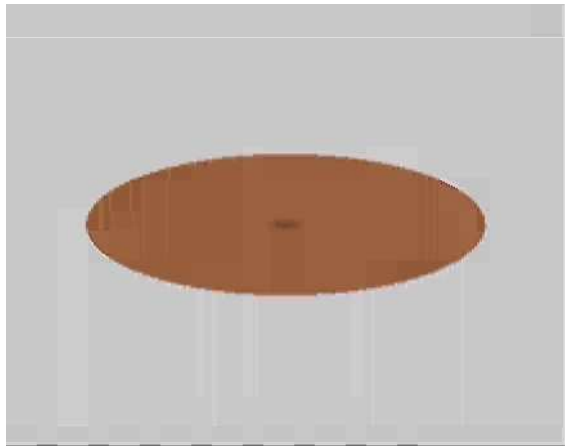
Modo 01 (frecuencia: f)



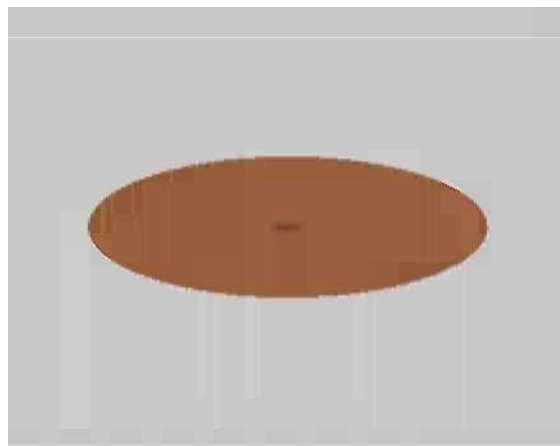
Modo 02 (frecuencia: $2.3 f$)



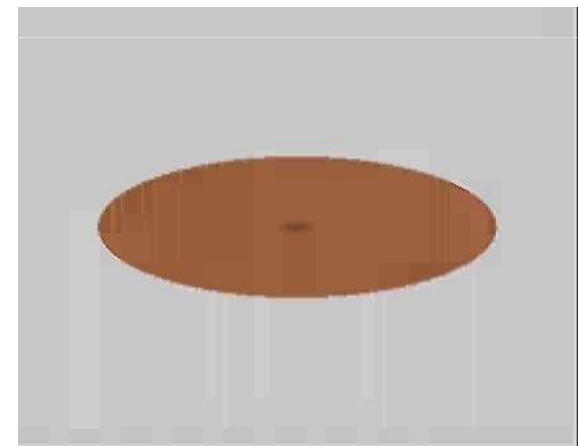
Modo 03 (frecuencia: $3.6 f$)



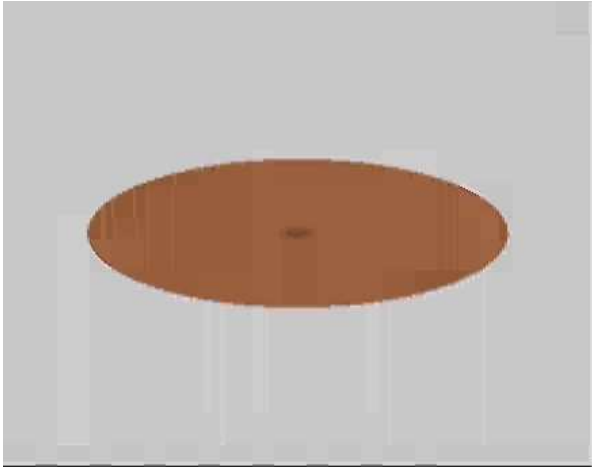
modo 11 (frecuencia: $1.6 f$)



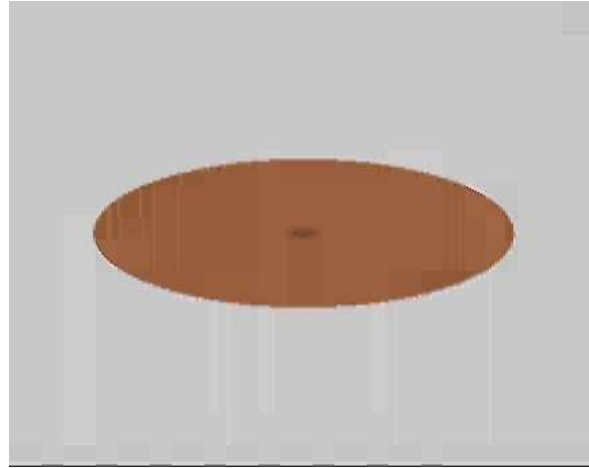
modo 12 (frecuencia: $2.9 f$)



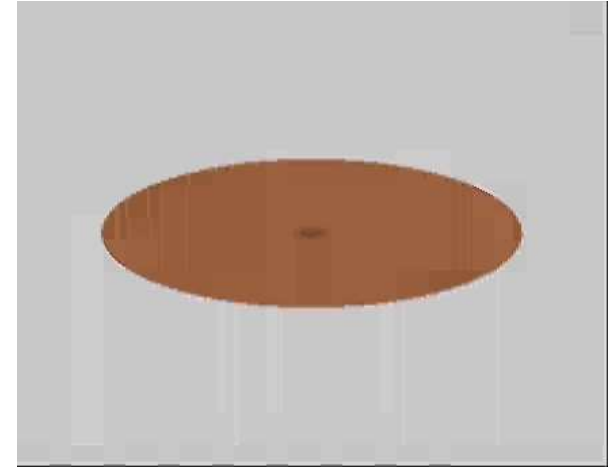
modo 13 (frecuencia: $4.2 f$)



modo 21 (frecuencia: 2.1 f)

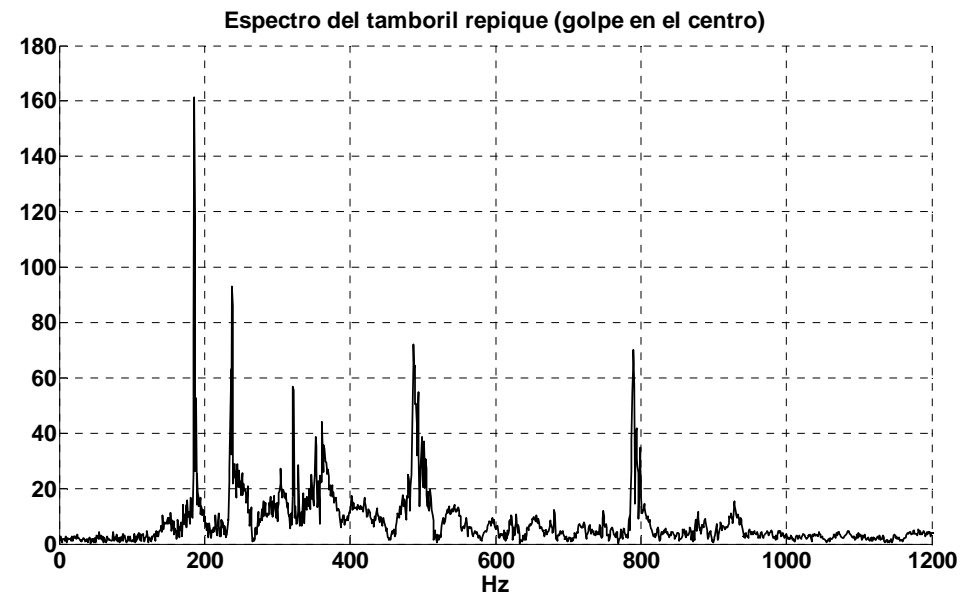
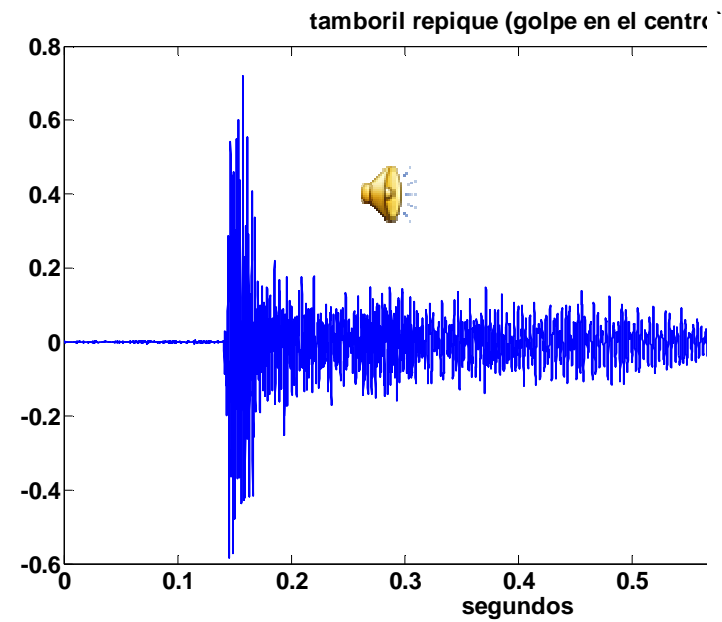
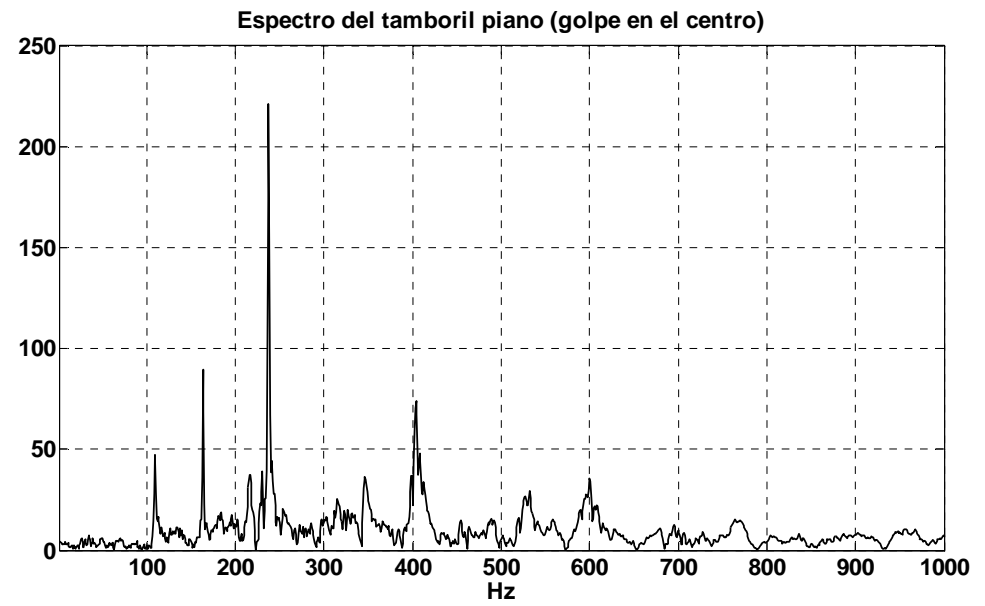
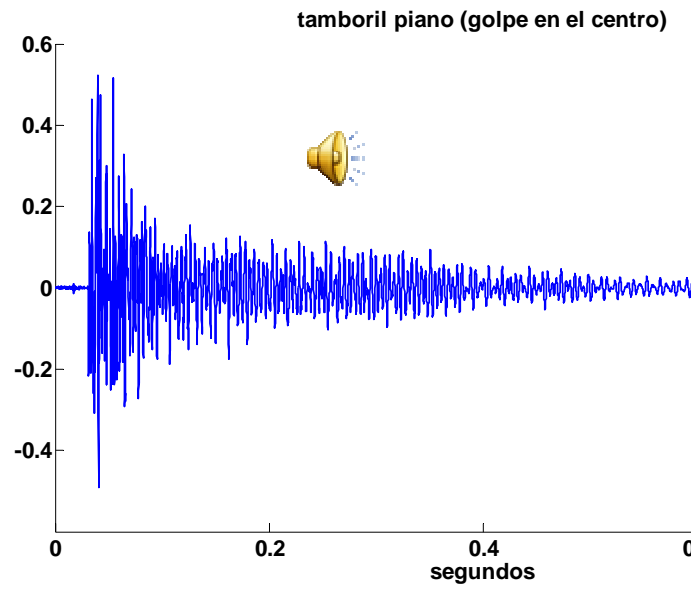


modo 22 (frecuencia: 3.5 f)

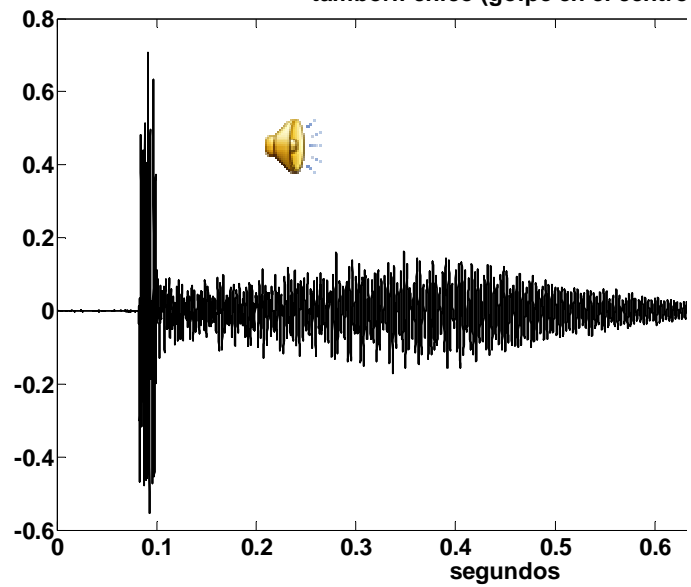


modo 23 (frecuencia: 4.8 f)

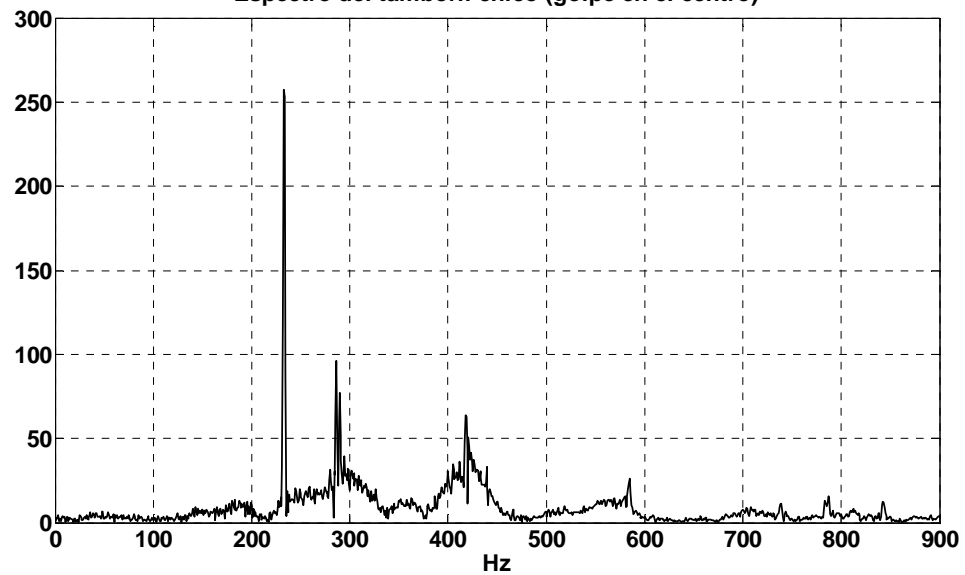
Piano, Repique y Chico



tamboril chico (golpe en el centro)



Espectro del tamboril chico (golpe en el centro)



La música

- La actual escala musical y la teoría de *la armonía* tienen sus más remotos orígenes en la teoría física de los modos normales de una cuerda vibrante con ambos extremos fijos.
- *La armonía* que es el estudio de cómo combinar sonidos (ya sean simultáneos o en sucesión) de forma que resulten “agradables al oído”.
- Pitágoras (aprox. 582-507 AC) observó que si dos sonidos de diferentes frecuencias se escuchan simultáneamente, el conjunto resulta tanto más “agradable” (*consonancia*) cuanto menores sean los números enteros mínimos que expresan la relación entre sus frecuencias.
- Esto significa que, dado un sonido de frecuencia f_0 , la combinación más agradable con él es otro sonido de frecuencia $f_1 = 2f_0$.
- También resultan agradables, aunque al parecer cada vez en menor medida, las combinaciones de la frecuencia f_0 con $3f_0$, con $4f_0$, con $5f_0$ y con $6f_0$. Ya no tanto con $7f_0$.



f_0



$f_0 + 2f_0$



$f_0 + 3f_0$



$f_0 + 4f_0$



$f_0 + 5f_0$



$f_0 + 6f_0$



$f_0 + 7f_0$

CONSTRUCCIÓN DE LA ESCALA PITAGÓRICA

Cada nueva nota de la octava es el tercer armónico de la última nota reducida a la octava en construcción (por divisiones sucesivas entre 2).

Los números entre paréntesis indican el orden de la construcción de la escala

tónica		2da.		3ra.		4ta.		5ta.		6ta.		7ma.	
(1)	1	(7)	9/8	(12)	81/64	(17)	729/512 4/3	(4)	3/2	(9)	27/16	(14)	243/128
(2)	2	(6)	9/4	(11)	81/32	(16)	729/256	(3)	3	(8)	27/8	(13)	243/64
	4	(5)	9/2	(10)	81/16	(15)	729/128						

INTERVALOS RESULTANTES

2da./tónica	3ra./2da.	4ta./3ra.	5ta./4ta.	6ta./5ta.	7ma./6ta.	8va./7ma.
9/8	9/8	9/8 256/243	256/243 9/8	9/8	9/8	256/243
int. mayor	int. mayor	int. menor	int. mayor	int. mayor	int. mayor	int. menor



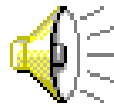
escala pitagórica
estricta



escala pitagórica
modificada

Escala pitagórica

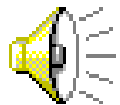
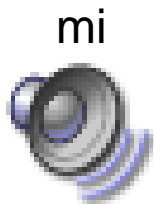
	Largo de la cuerda	Frecuencia	Cociente con nota anterior	Nombre de la nota
Tónica	L	f		DO
Segunda	$\frac{8}{9}L$	$\frac{9}{8}f$	$\frac{9}{8}=1.125$	RE
Tercera	$\frac{64}{81}L$	$\frac{81}{64}f$	$\frac{9}{8}=1.125$	MI
Cuarta	$\frac{3}{4}L$	$\frac{4}{3}f$	$\frac{256}{243}=1.053$	FA
Quinta	$\frac{2}{3}L$	$\frac{3}{2}f$	$\frac{9}{8}=1.125$	SOL
Sexta	$\frac{16}{27}L$	$\frac{27}{16}f$	$\frac{9}{8}=1.125$	LA
Séptima	$\frac{128}{243}L$	$\frac{243}{128}f$	$\frac{9}{8}=1.125$	SI
Octava	$\frac{1}{2}L$	$2f$	$\frac{256}{243}=1.053$	DO



Escala diatónica (Zarlino 1588)

	Largo de la cuerda	Frecuencia	Cociente con nota anterior	Nombre de la nota
Tónica	L	f		DO
Segunda	$8/9L$	$9/8f$	$9/8 = 1.125$	RE
Tercera	$4/5L$	$5/4f$	$10/9 \approx 1.111$	MI
Cuarta	$3/4L$	$4/3f$	$16/15 \approx 1.067$	FA
Quinta	$2/3L$	$3/2f$	$9/8 = 1.125$	SOL
Sexta	$3/5L$	$5/3f$	$10/9 \approx 1.111$	LA
Séptima	$8/15L$	$15/8f$	$9/8 = 1.125$	SI
Octava	$1/2L$	$2f$	$16/15 \approx 1.067$	DO

Diferencias entre las escalas de Pitágoras y de Zarlino:



La menor relación entre frecuencias de la escala diatónica es entre un tono menor y un semitono $10/9:16/15 = 25/24$

La escala cromática

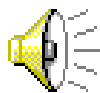
Para enriquecer la armonía se vio la necesidad de agregar sonidos intermedios entre los tonos mayores, menores y los semitonos. Así surge la *escala cromática*, que define para cada nota de frecuencia f su *sostenido* (con frecuencia $25/24 f$) y su *bemol* (con frecuencia $24/25 f$). En esta escala se ve fácilmente que el sostenido de una nota *no coincide* con el bemol de la siguiente.



Nota	Frecuencia exacta	frec.aprox
DO (tonica)	f	f
DO [#]	$25/24 f$	1.042 f
RE ^b	$9/8 f \times 24/25 = 27/25 f$	1.080 f
RE	$9/8 f$	1.125 f
RE [#]	$9/8 f \times 25/24 = 75/64 f$	1.172 f
MI ^b	$5/4 f \times 24/25 = 6/5 f$	1.200 f
MI	$5/4 f$	1.250 f
FA ^b	$4/3 f \times 24/25 = 32/25 f$	1.280 f
MI [#]	$5/4 f \times 25/24 = 125/96 f$	1.302 f
FA	$4/3 f$	1.333 f
FA [#]	$4/3 f \times 25/24 = 25/18 f$	1.389 f
SOL ^b	$3/2 f \times 24/25 = 36/25 f$	1.440 f
SOL	$3/2 f$	1.500 f
SOL [#]	$3/2 f \times 25/24 = 25/16 f$	1.563 f
LA ^b	$5/3 f \times 24/25 = 8/5 f$	1.600 f
LA	$5/3 f$	1.667 f
LA [#]	$5/3 f \times 25/24 = 125/72 f$	1.736 f
SI ^b	$15/8 f \times 24/25 = 9/5 f$	1.800 f
SI	$15/8 f$	1.875 f
DO ^b	$2 f \times 24/25 = 48/25 f$	1.920 f
SI [#]	$15/8 f \times 25/24 = 125/64 f$	1.953 f
DO	$2f$	$2f$

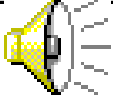
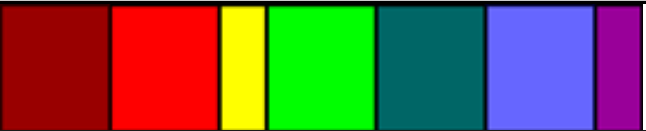

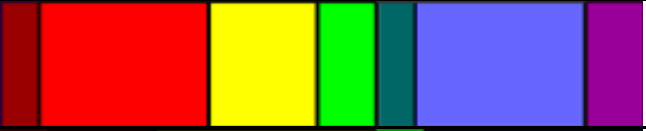

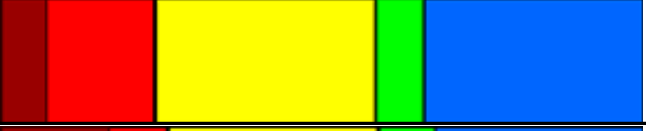
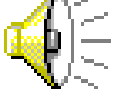

Escala temperada

Juan Sebastian Bach, después de numerosas discusiones con los matemáticos Rameau y D'Alembert, introdujo en su famosa obra "El clavecín bien temperado" (1722-1744) una nueva escala musical, de forma de reducir a 12 las notas dentro de una octava (7 teclas blancas y 5 negras en el teclado). Esta se llamó *escala temperada* o *equitemperada*.



Nota	Frecuencias exactas	Frec aprox.
DO	f	f
DO [#] =RE ^b	$\sqrt[12]{2} f$	1.060 f
RE	$(\sqrt[12]{2})^2 f = \sqrt[6]{2} f$	1.123 f
RE [#] =MI ^b	$(\sqrt[12]{2})^3 f = \sqrt[4]{2} f$	1.189 f
MI	$(\sqrt[12]{2})^4 f = \sqrt[3]{2} f$	1.260 f
FA	$(\sqrt[12]{2})^5 f$	1.335 f
FA [#] =SOL ^b	$(\sqrt[12]{2})^6 f = \sqrt{2} f$	1.414 f
SOL	$(\sqrt[12]{2})^7 f$	1.498 f
SOL [#] =LA ^b	$(\sqrt[12]{2})^8 f = (\sqrt[3]{2})^2 f$	1.590 f
LA	$(\sqrt[12]{2})^9 f = (\sqrt[4]{2})^3 f$	1.682 f
LA [#] =SI ^b	$(\sqrt[12]{2})^{10} f = (\sqrt[6]{2})^5 f$	1.782 f
SI	$(\sqrt[12]{2})^{11} f$	1.888 f
DO	$2f$	$2f$

Otras escalas musicales

Audio	Nombre	Mapa de frecuencias
	Notas (esc. Diatónica)	DO RE MI FA SOL LA SI DO
	Diatónica (occidental)	
	Shree (India)	
	Sorog (Bali)	
	Hirajoshi (Japón)	

Bibliografía

Harvey E. White. *Física Moderna*. UTEHA. 1962

Carine Pascal, Nathalie Tomas. *Musique et Mathematiques*. Tesis de maestría en Matemática. Faculté des Sciences de Luminy, Université de la Méditerranée (1999-2000).

Michael Beer. "How do Mathematics and Music relate to each other?" East Coast College of English, Brisbane. 1998

Ismael Núñez: "La Física y la Música". *Conversación*. Revista de Reflexión y Experiencia Educativa Nro. 10, Abril de 2005, pp. 46-50.

Stelio Haniotis, Ismael Núñez, "La Física de la Música". *Educación en Física* (Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay). Vol. 6 Nro. 8. Setiembre de 2004.

http://www.xtec.es/centres/a8019411/caixa/index_es.htm.

<http://www.freeplay.com/wmm.htm>.

<http://acusticaweb.com/>

<http://www.glenbrook.k12.il.us/GBSSCI/PHYS/mmedia/waves/edl.html>

<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/>

http://www.isvr.soton.ac.uk/spcg/Tutorial/Tutorial/Tutorial_files/Web-basics-nature.htm