

Fundamentos de acústica

Acústica

- La **acústica** *estudia las ondas sonoras en su*
 - *generación,*
 - *propagación y*
 - *recepción,*
- *así como las circunstancias que producen estos tres procesos cuando se crea una perturbación acústica.*
- La acústica es la parte de la física que trata de la producción, emisión, recepción, propagación, interacción y utilización de las ondas sonoras (RACEFNA)

Sonido

- El **sonido** es *la sensación que experimenta el nervio acústico por medio de los diferentes órganos del oído, producido por una onda longitudinal que se propaga en un medio elástico (RACEFNA)*

Ondas sonoras

- El sonido consiste en vibraciones de las moléculas de aire. Los átomos y moléculas en el aire se mueven extremadamente rápido (alredor de 500 metros por segundo).
- No lo percibimos porque las moléculas de aire son extremadamente ligeras.
- El camino libre medio de las moléculas de aire es de 6×10^{-8} metros. Esta es la distancia que pueden viajar en promedio hasta que chocan con otra.

Ondas sonoras

- Estas colisiones entre moléculas son perfectamente elásticas (como bolas de billar) por lo que no pierden velocidad.
- Por tanto, el aire consiste en un gran número de moléculas muy próximas que están colisionando continuamente unas con otras produciendo lo que se percibe como **presión del aire o presión atmosférica**.

Ondas sonoras

- Cuando un objeto vibra, ocasiona ondas de presión (es decir cambios en la presión con distintos niveles)
- Estas ondas se perciben por el oído como sonido (**PSICOACÚSTICA**).
- Ejemplo: Se golpea la membrana de un tambor y esta vibra en uno y otro sentido, produciendo compresiones y rarefacciones del aire que la rodea. Es decir, produciendo variaciones de presión acústica, respecto a la presión atmosférica de equilibrio.
- Primero examinaremos la naturaleza de estas ondas.

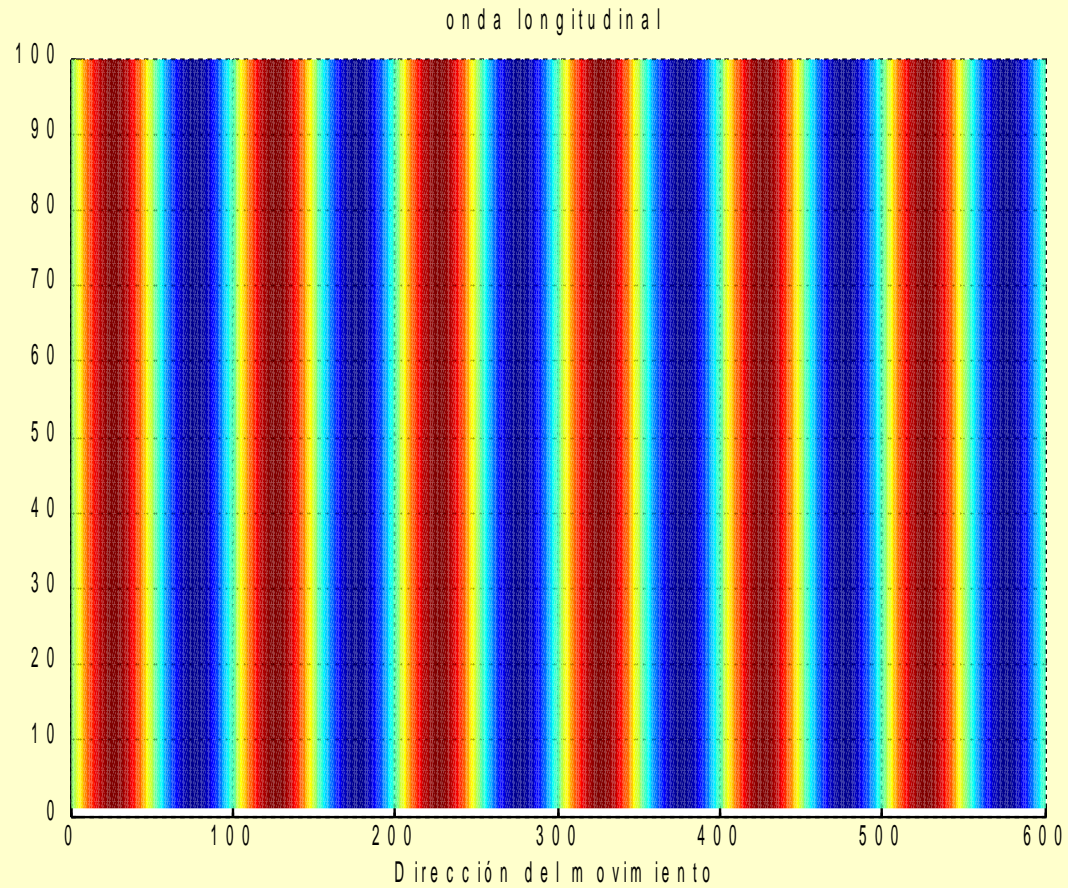
Ondas sonoras

- El sonido viaja por el aire a 340 metros por segundo.
 - Esto no significa que una molécula viaje a esta velocidad, sino que la perturbación local de presión se propaga a esta velocidad.
- Es algo parecido a lo que ocurre con las olas del mar. El agua no se mueve (sólo sube o baja), pero la perturbación en la superficie si se propaga.

Diferencia olas y sonido

- En las olas, los movimientos locales en la onda son perpendiculares a la dirección de propagación de la misma. Dichas ondas se denominan transversales (Las ondas electromagnéticas también son transversales)
- En el sonido, los movimientos involucrados tienen la misma dirección que la propagación de la onda. Dichas ondas se denominan longitudinales.

Onda longitudinal



Ondas sonoras

- Mediante **transductores** es posible transformar energía acústica en eléctrica (micrófono), energía eléctrica en acústica (altavoz), energía mecánica en acústica (tambor), etc...
- Los cambios de presión de las vibraciones sonoras pueden ser producidos de forma periódica (violín) o no periódicas (tambor).

Física del sonido

- **Un ciclo** es una secuencia completa de una vibración periódica, pasando por una rarefacción y una compresión hasta volver al mismo estado inicial.
- **Amplitud** es el tamaño de la vibración, es decir el desplazamiento de la presión sonora respecto a la presión atmosférica de equilibrio. Se percibe como el **volumen**.
- La **frecuencia** de la vibración. Es el número de ciclos que pasan por un punto en un segundo. A veces no percibimos exactamente la frecuencia de la señal por lo que se denomina **pitch** a la frecuencia percibida.
- El recíproco de la frecuencia es el **periodo** (intervalo de tiempo que dura un periodo).

Física del sonido

- **La longitud de onda**, es la distancia que recorre el sonido en un ciclo completo de cambio de presión, y es la medida física de la longitud de un ciclo.
- **Fase** de una onda. Una onda con fase 0, debe comenzar en un ángulo 0 (amplitud 0 para el seno y 1 para el coseno). Si comienza en otro valor, hay que calcular el ángulo de comienzo.
- **Fase** de dos ondas. Cuando dos ondas sonoras coinciden en sus variaciones positivas y negativas, se dice que **están en fase**, si coinciden de forma opuesta se dice que están en **oposición de fase**.
- Si existe un retardo o adelanto entre ambas, se dice que existe un **desplazamiento de fase**.

Física del sonido

- **Timbre**. Depende de la forma del espectro de la onda de sonido.
- En música también se considera la **duración** del sonido.

Rango de valores

- Margen de frecuencias en el que operan los dispositivos de audio:

20 Hz – **20 kHz.**

- Margen de longitudes de onda correspondientes:

17 metros - **1,7 cm**

- Margen de periodos (duración de ciclos):

5 centésimas de segundo - **5 nanosegundos**

$$\textit{Periodo} = \frac{1}{\textit{frecuencia}}$$

$$\textit{longitud de onda} = \frac{\textit{velocidad}}{\textit{frecuencia}}$$

¿Porqué ondas sinusoidales?

- La ecuación del movimiento armónico simple

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\kappa y$$

tiene como solución las funciones:

$$y = A \cos \sqrt{\kappa t} + B \sin \sqrt{\kappa t}$$

o también:

$$y = c \sin(\sqrt{\kappa t} + \phi)$$

¿Porqué ondas sinusoidales?

- Esta ecuación diferencial representa lo que le ocurre a un objeto cuando:
 - está sujeto a fuerzas que lo mantienen en una posición de equilibrio,
 - y se aplica una fuerza perturbadora que lo separa de dicha posición, siendo proporcional la fuerza a la distancia que se desplaza desde la posición de equilibrio.
- En el oído, esto es bastante aproximado a la ecuación de movimiento de un punto en la membrana basilar.

¿Porqué ondas sinusoidales?

- Por otro lado, muchos sistemas que producen sonido muestran unos modos fuertemente sinusoidales.

Parámetros onda sinusoidal

- El sonido puede deberse a sucesos periódicos (musical) o transitorios (percusión). Cualquier fenómeno periódico se puede descomponer como una suma de señales sinusoidales. Los parámetros que caracterizan una señal sinusoidal son:
 - **Amplitud**: Valor de la perturbación (presión del aire, voltaje, etc...)
 - **Frecuencia**: El número de periodos por segundo. Está relacionado con el **Periodo** (tiempo necesario para un ciclo completo) y con la **longitud de onda** (tamaño en metros de un periodo).
 - **Fase**: retardo en el comienzo de la onda.

Parámetros onda sinusoidal

- Relación entre parámetros onda sinusoidal

$$T = \frac{1}{frecuencia}$$

$$\lambda = \frac{velocidad}{frecuencia}$$

- Ejemplo de valores

Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Longitud de onda (m)
110	0.009	3.12
440	0.0022	0.7818
880	0.0011	0.3909
1760	5.68E-4	0.1954
3520	2.84E-4	0.097

Conceptos relativos al Volumen

- Las magnitudes físicas relativa al volumen de un sonido son:
 - La **amplitud**: Describe el desplazamiento de la presión sonora, arriba y abajo respecto a la presión atmosférica de equilibrio.
 - Presión atmosférica de equilibrio: $0,044 \text{ kg/m}^2$
 - Presión ejemplo sonido fuerte: $4,40 \text{ kg/m}^2$
 - También puede utilizarse la amplitud para describir las oscilaciones del voltaje una vez que se mide el sonido con un micrófono.

Conceptos relativos al Volumen

- **Rango dinámico** del oído: Margen de valores entre el sonido más débil y el más fuerte. El sonido más fuerte tiene un valor miles de millones de veces más grande que el sonido más débil.
- **Intensidad** onda sonora: Es la densidad de potencia, dada en Watios/m². Debido al rango dinámico tan grande, se utilizan dB como unidad de medida.

Decibelios

- El decibelio es un sistema de medida logarítmico y tiene su origen en la telefonía donde la pérdida en un cable es una función logarítmica de su longitud.
- ***La audición humana también tiene una respuesta logarítmica con respecto al nivel de presión del sonido (SPL).*** Para relacionarlo a la medida subjetiva del nivel de una señal de audio, se adoptó el decibelio para audio. A continuación se muestra la definición matemática del decibelio.
- En primer lugar se definió el Bel, en honor del Alexander Graham Bell (el inventor del teléfono). Sin embargo, se encontró excesivamente grande para propósitos prácticos y se dividió en 10 decibelios.

Decibelios

- A continuación se muestra la definición matemática del decibelio.

$$1 \text{ Bel} = \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \qquad 1 \text{ deciBel} = \frac{1}{10} \text{ Bel}$$

Nivel de intensidad $dB = 10 \times \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$

Cociente de potencias utilizando amplitudes (Voltaje) $dB = 20 \times \log_{10} \frac{V_1}{V_2}$

- El nivel de intensidad se puede estandarizar colocando en el denominador del logaritmo un valor de referencia

Decibelios

- En Acústica, para expresar en dB el nivel de intensidad (Li) se utiliza la referencia de $10^{(-12)} W/m^2$. Este nivel de referencia de la densidad de potencia, corresponde aproximadamente a la presión del sonido más débil que podemos percibir.
- Si se utilizaran expresiones basadas en cociente de amplitudes (La potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud) habría que multiplicar la cantidad calculada por 2.

Decibelios

- **Umbral de audición**: El valor de referencia para el nivel de presión sonora (SPL) corresponde a una presión de **0,00002 dinas/cm² (pascuales)**. Este valor es el umbral de audición, es decir, el nivel más débil que puede percibirse y es igual a **0 dB SPL**.
- **Umbral de dolor**: es el nivel más alto que se puede percibir, a partir del cual el oído sufre daños y corresponde a **120 dB SPL**.

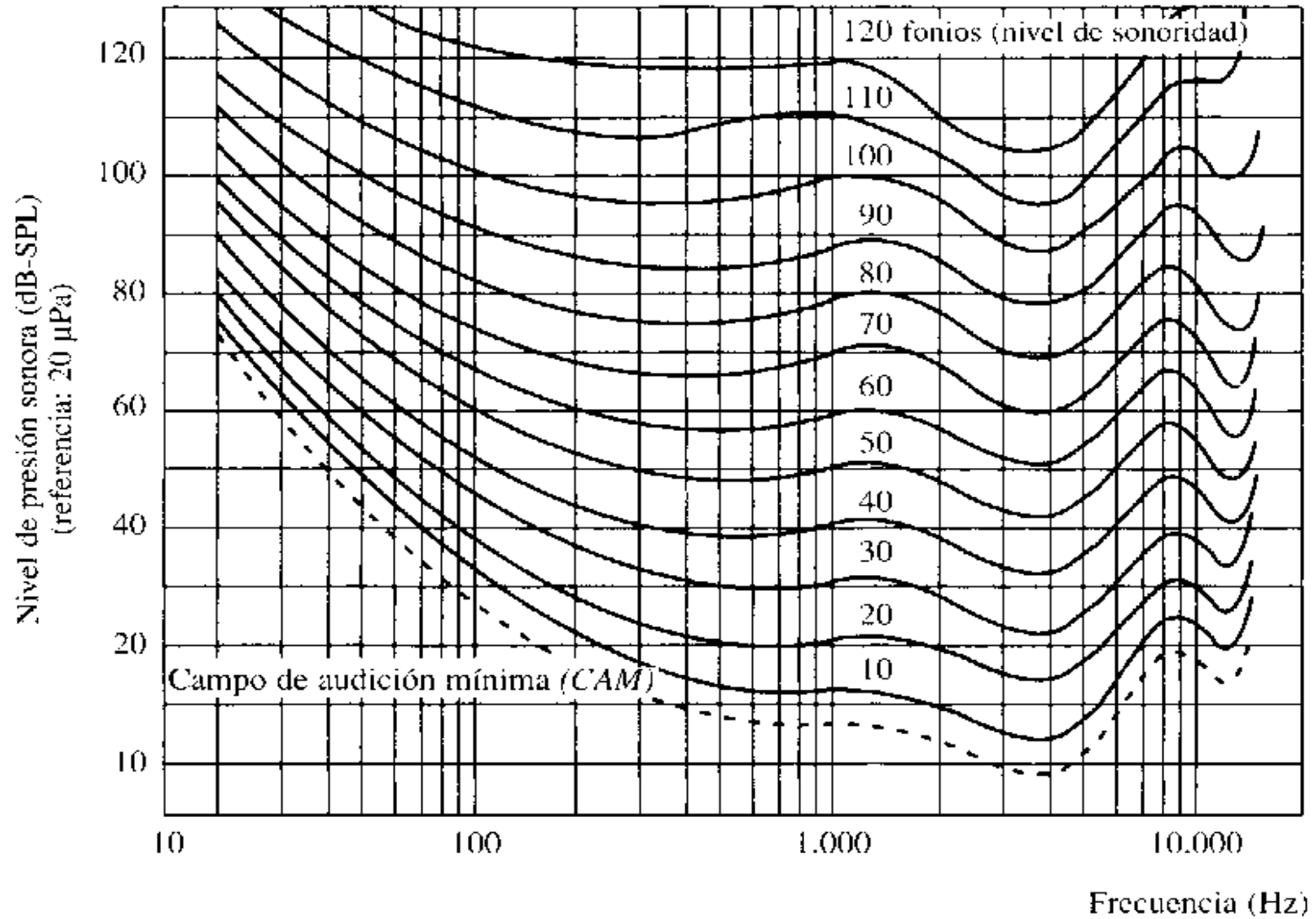
Sonoridad

- La **sonoridad** es el atributo de la sensación auditiva que permite ordenar los sonidos en una escala que se extiende desde los sonidos más débiles hasta los más fuertes. (RACEFNA)
- Como es relativo a la sensación auditiva y no a un parámetro físico, distintas personas pueden escuchar el mismo sonido con niveles de sonoridad diferentes.
- La respuesta subjetiva al nivel se denomina **intensidad** (loudness) y se mide en **fonios** (phons). La escala de fonios se define para coincidir con la escala SPL a 1 kHz, pero a otras frecuencias se desvía.

Sonoridad

- La sensibilidad del oído para determinar si un sonido es fuerte o débil, no solo depende de su volumen, sino también de la frecuencia.
- En la siguiente figura se muestran las curvas de igual sonoridad, obtenidas sobre un gran número de personas por Robinson-Dadson.
- Cada curva representa *el margen de frecuencias percibidas con una misma sonoridad*. La curva inferior corresponde al umbral de audición. La respuesta varía en función de la intensidad. Cuanto más intenso sea el sonido más plana es la respuesta

Curvas de igual sonoridad



Curvas de igual sonoridad

- Las curvas de igual sonoridad se definen en fonios.
- Un **fonio** es la unidad de nivel de sonoridad de un tono puro de 1000 Hz de frecuencia, estimado por el oyente como equivalente en sonoridad a la señal cuyo nivel se requiere determinar. (RACEFNA)
- La sonoridad propiamente dicha se mide en sonios. Un sonido con una sonoridad de 20 sonios suena con una sonoridad doble que un sonido con una sonoridad de 10 sonios.
- Un **sonio** es la unidad de sonoridad que corresponde a la sensación producida por un sonido puro con una frecuencia de 1000 Hz y un nivel de presión sonora de 40 dB. (RACEFNA)

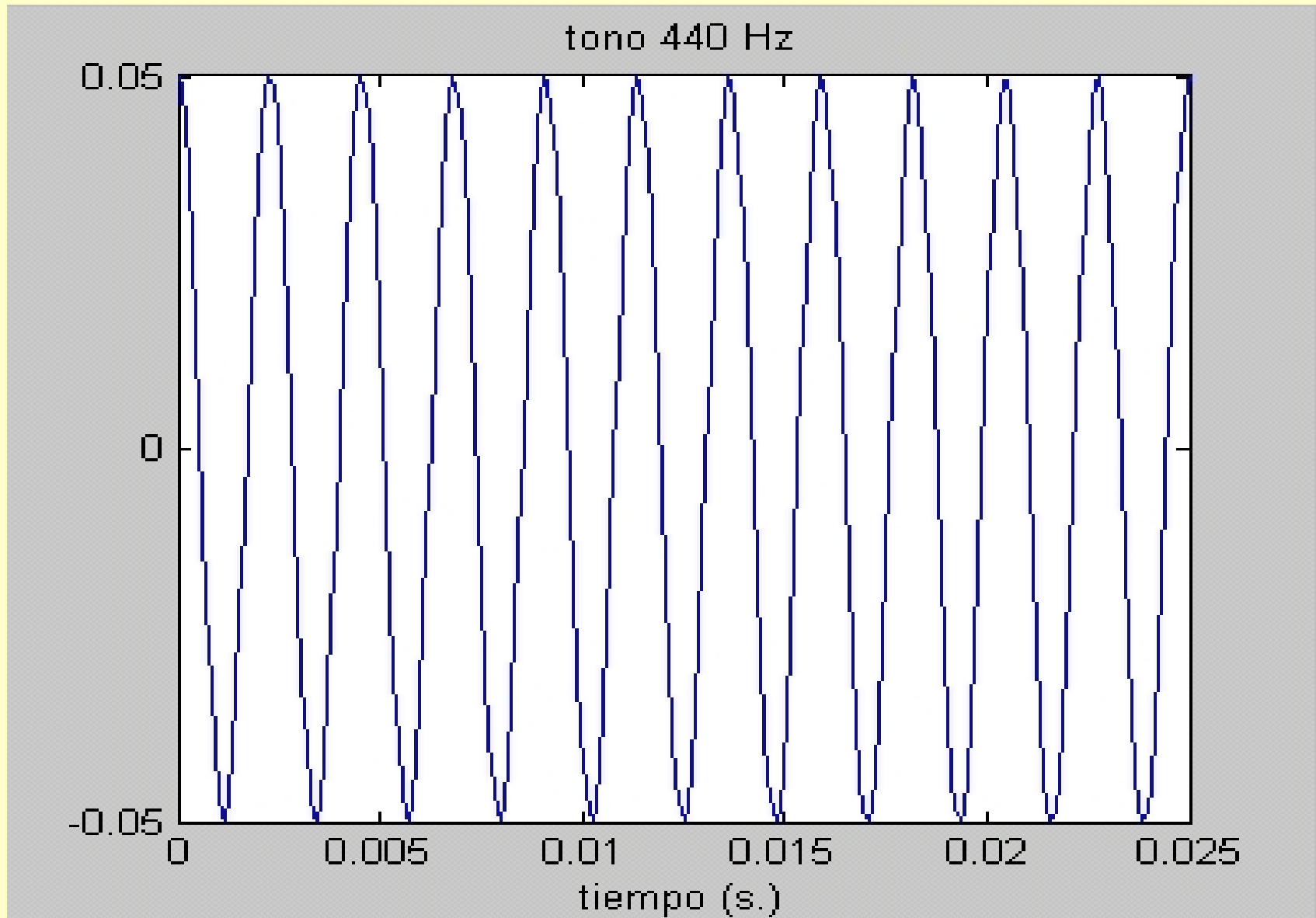
Conceptos relativos a la frecuencia

- **Altura sonora**: Atributo de la sensación sonora que permite ordenar los sonidos en una escala que se extiende desde los tonos más bajos hasta los más altos.
(RACEFNA)
- Los tonos más bajos son los graves y los más altos son los agudos.
- **Frecuencia**: Número de veces que se presenta un fenómeno o suceso en un intervalo de tiempo o espacio.
(RACEFNA)
- **Pitch**: Es la sensación de altura que percibe el oído.

Conceptos relativos a la frecuencia

- Parecería lógico que pitch y frecuencia fueran lo mismo. Sin embargo, esto no es del todo cierto. Esto sólo es correcto para el rango medio de frecuencias, pero para las frecuencias muy bajas y muy altas no se cumple.

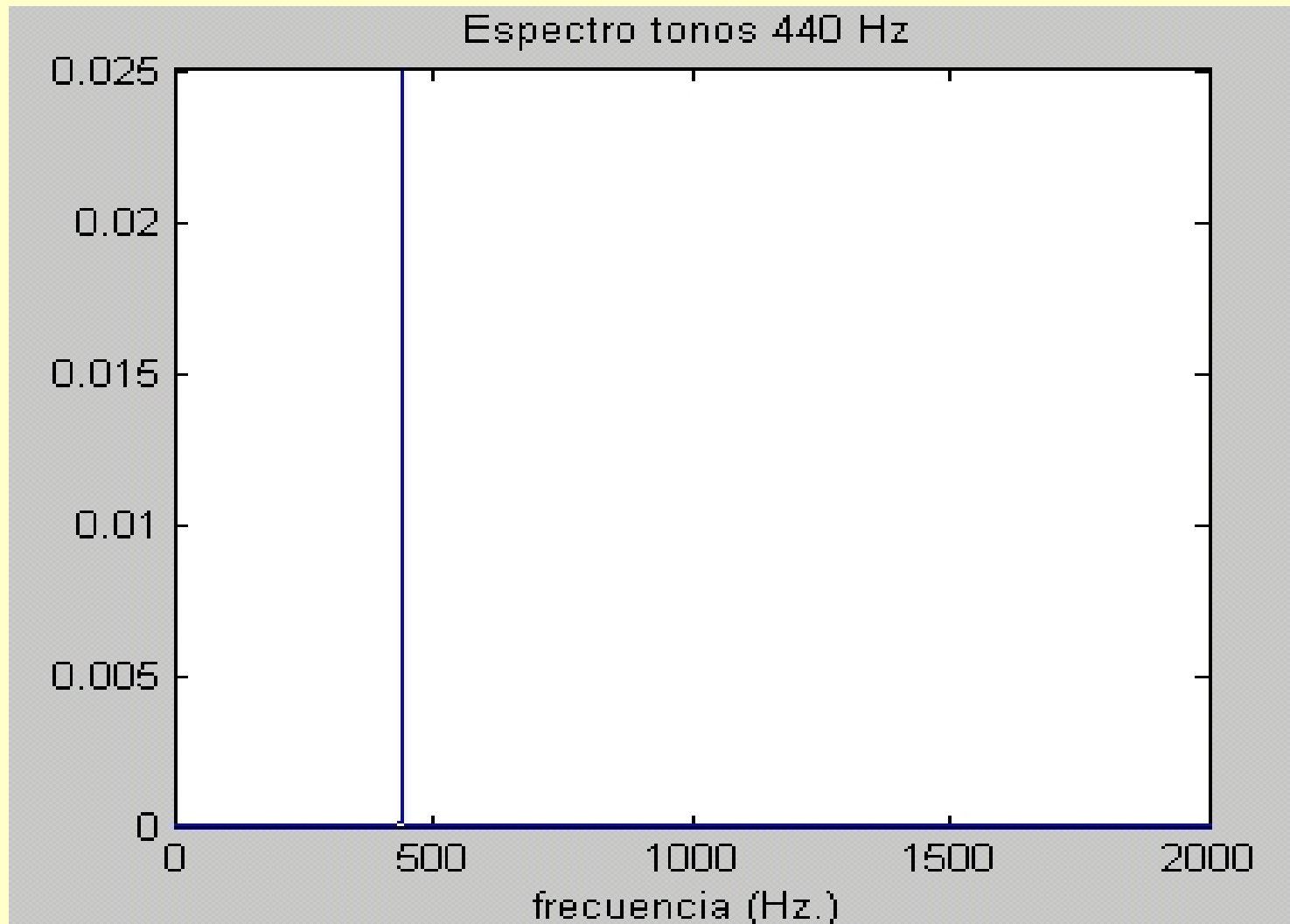
Tono puro



- Dado que en un segundo hay cien periodos de tiempo de 0.01 segundos, el número de repeticiones debe ser multiplicado por 100. Esto da lugar a una frecuencia de $4.4 \times 100 = 440$ Hz.
- Obsérvese que aunque podemos averiguar la frecuencia de la señal cometemos cierta imprecisión al determinarla. Es difícil saber a ojo si tenemos un 30% o un 40% de un periodo en un determinado intervalo de tiempo.

- En esta figura tenemos una representación exacta de cómo evoluciona la amplitud (en Voltios, por ejemplo) de un tono puro de 440 Hz de amplitud 1.
- Obsérvese que la curva empieza en 1, disminuye de amplitud hasta -1 y luego regresa a 1. Este ciclo se repite exactamente una y otra vez.
- Para determinar la frecuencia de esta señal tengamos en cuenta que hasta el valor 0.01 de tiempo se encuentran 4.4 periodos (algo menos de 4 y medio).
- Dado que en un segundo hay cien periodos de tiempo de 0.01 segundos, el número de repeticiones debe ser multiplicado por 100. Esto da lugar a una frecuencia de $4.4 \times 100 = 440$ Hz. Obsérvese que aunque podemos

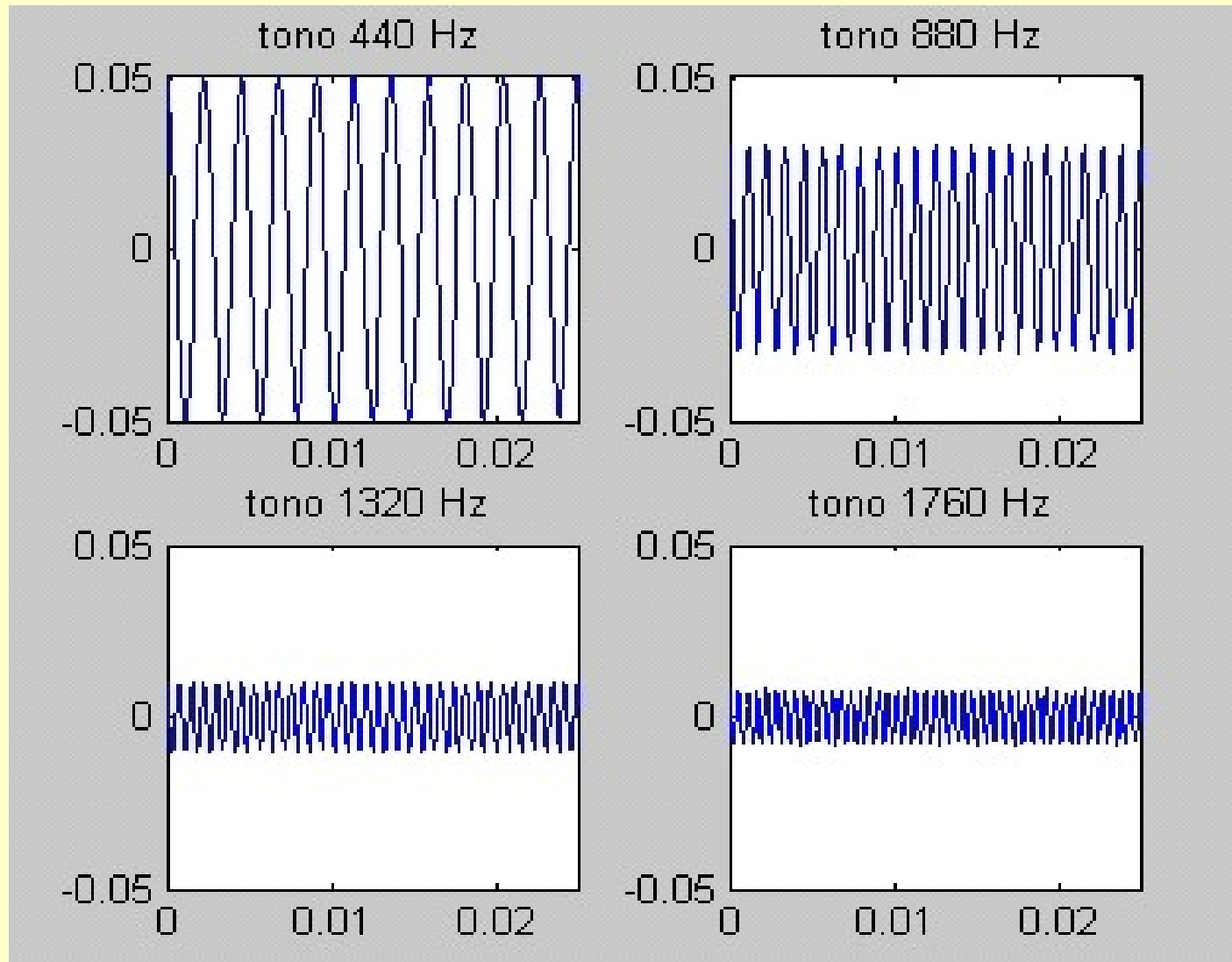
Espectro tono puro



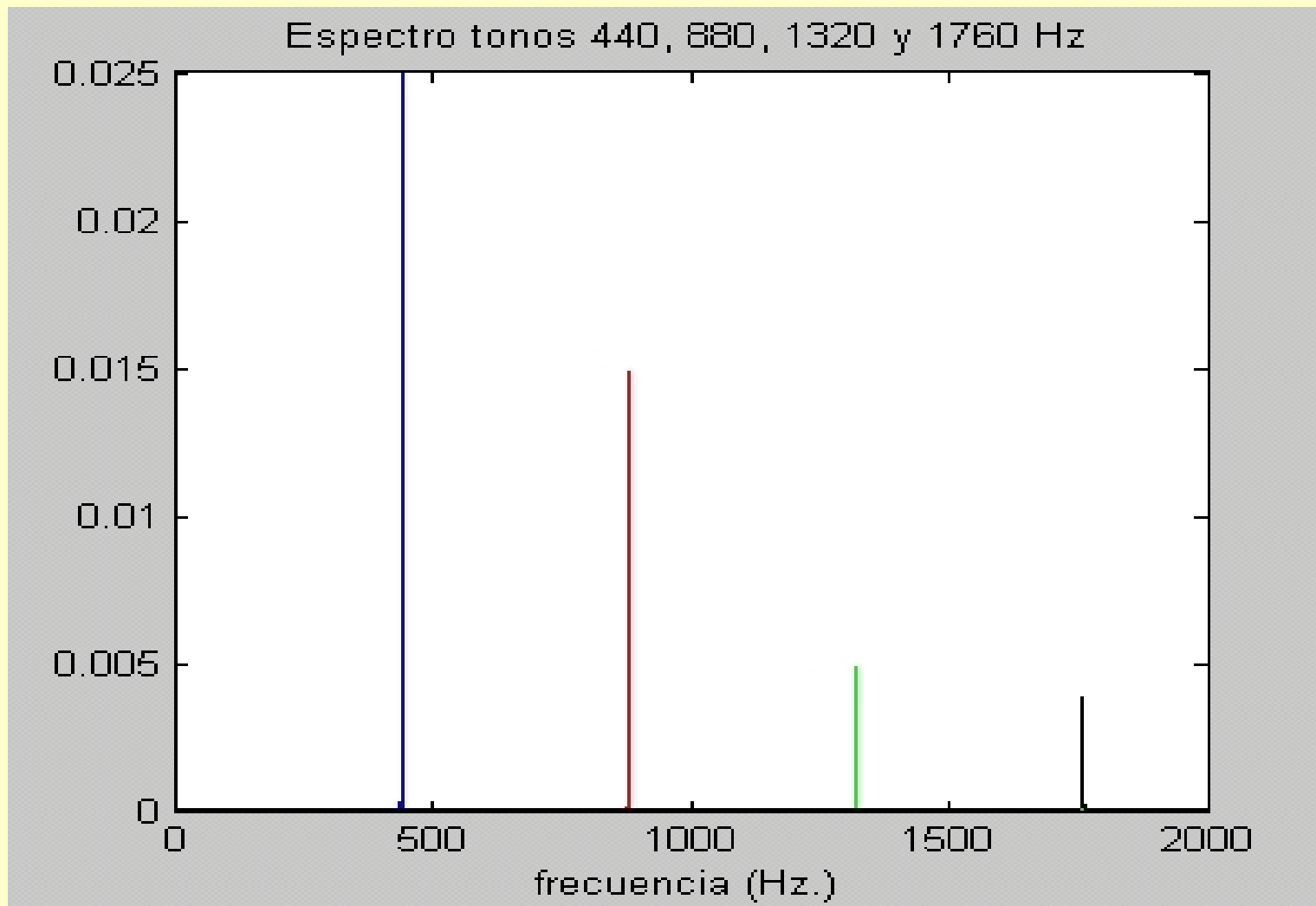
- Se observa una única línea vertical justamente en la frecuencia de los 440 Hz.
- Por razones matemáticas (el espectro está en función de exponenciales complejas y no de senos) la amplitud observada (0.025) debe multiplicarse por dos para dar la amplitud del coseno que la generó (0.05).
- Esta es exactamente la amplitud del coseno que se utilizó para generar dicho tono.

- Apréciase, en primer lugar, que esta figura y la anterior hacen referencia al mismo fenómeno físico, por lo que se pueden considerar como dos maneras distintas de representar la misma información. Sin embargo, la frecuencia es mucho más fácil de determinar en esta situación. Además nos permite saber de un vistazo si nuestra señal tiene una o más componentes en frecuencia.

Frecuencia 440 Hz y sus múltiplos



Frecuencia 440 Hz y sus múltiplos



Armónico

- Si dos sonidos tienen frecuencias que son múltiplos entre sí, se dice que son armónicos.
- Por ejemplo, 262 y 522 Hz son armónicos entre sí, porque cada periodo de la señal de 262 Hz contiene exactamente dos periodos de la señal de 522 Hz.
- 262 y 786 Hz son armónicos entre sí, porque cada periodo de la señal de 262 Hz contiene exactamente tres periodos de la señal de 786 Hz.

Escala

- Tengamos en cuenta que si duplicamos la frecuencia, la nota superior tendrá sus armónicos solapados con armónicos de la frecuencia inferior, por lo que la consonancia será perfecta.
- En este caso tendremos la misma nota musical en dos octavas diferentes (La₄ y La₅, por ejemplo).
- Por tanto, sólo podremos hablar de notas musicales diferentes mientras que no se duplique la frecuencia de alguna de ellas.

Escala eptáfona

-
- Eptáfona: Consideramos 7 notas musicales en cada octava (Do, Re, Mi, Fa, Sol, La Si).
- Dodecáfona: Consideramos 12 notas musicales en cada octava (Las anteriores mas Do#, Re#, Fa#, Sol#, La#)
- ¿Que frecuencia asignamos a cada nota?

Encadenamiento de quintas

- Partimos de la frecuencia de un Do (262, por ejemplo) y multiplicamos por $3/2$ consecutivamente 11 veces
- Al ir creciendo la frecuencia, excederá el límite de la octava, por lo que habrá que dividir varias veces por dos hasta que se encuentre dentro del rango 262-522.
- De esta manera tendremos las frecuencias de las notas:
- Do, Sol, Re, La, Mi, Si, Fa#, La#, Do#, Sol#, Re#, La#, Fa
- 262 393 294,75 442,13 331,59 497,39 373,04
279,78 419,67 314,76 472,13 354,1

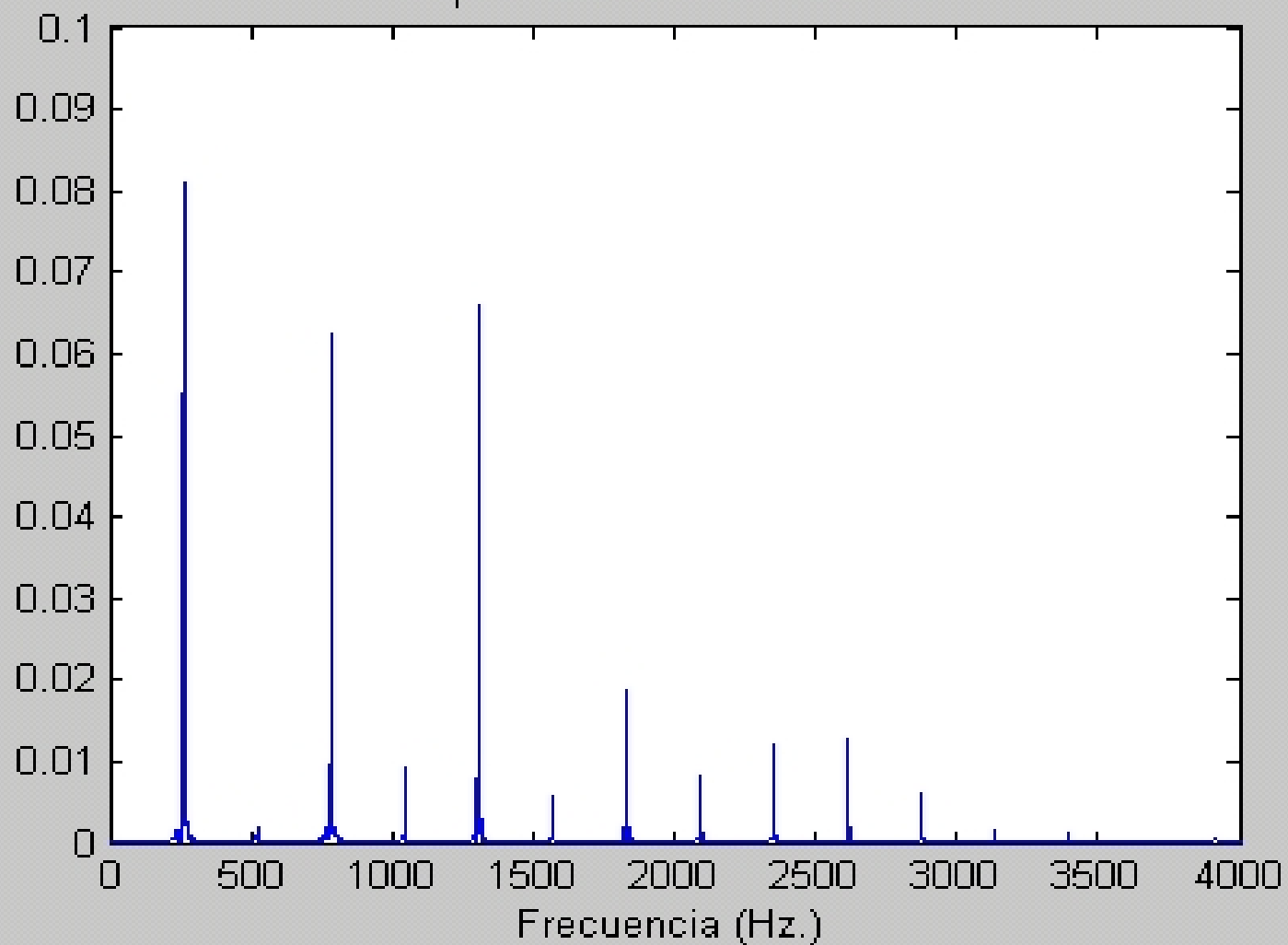
Escala Temperada

- Se divide la octava en doce semitonos absolutamente iguales entre sí
- 262 283,83 305,67 327,5 349,33 371,17 393
414,83 436,67 458,5 480,33 502,17
- Do, Do#, Re, Re#, Fa, Mi, Mi#, Sol, Sol#, La, La#, Si

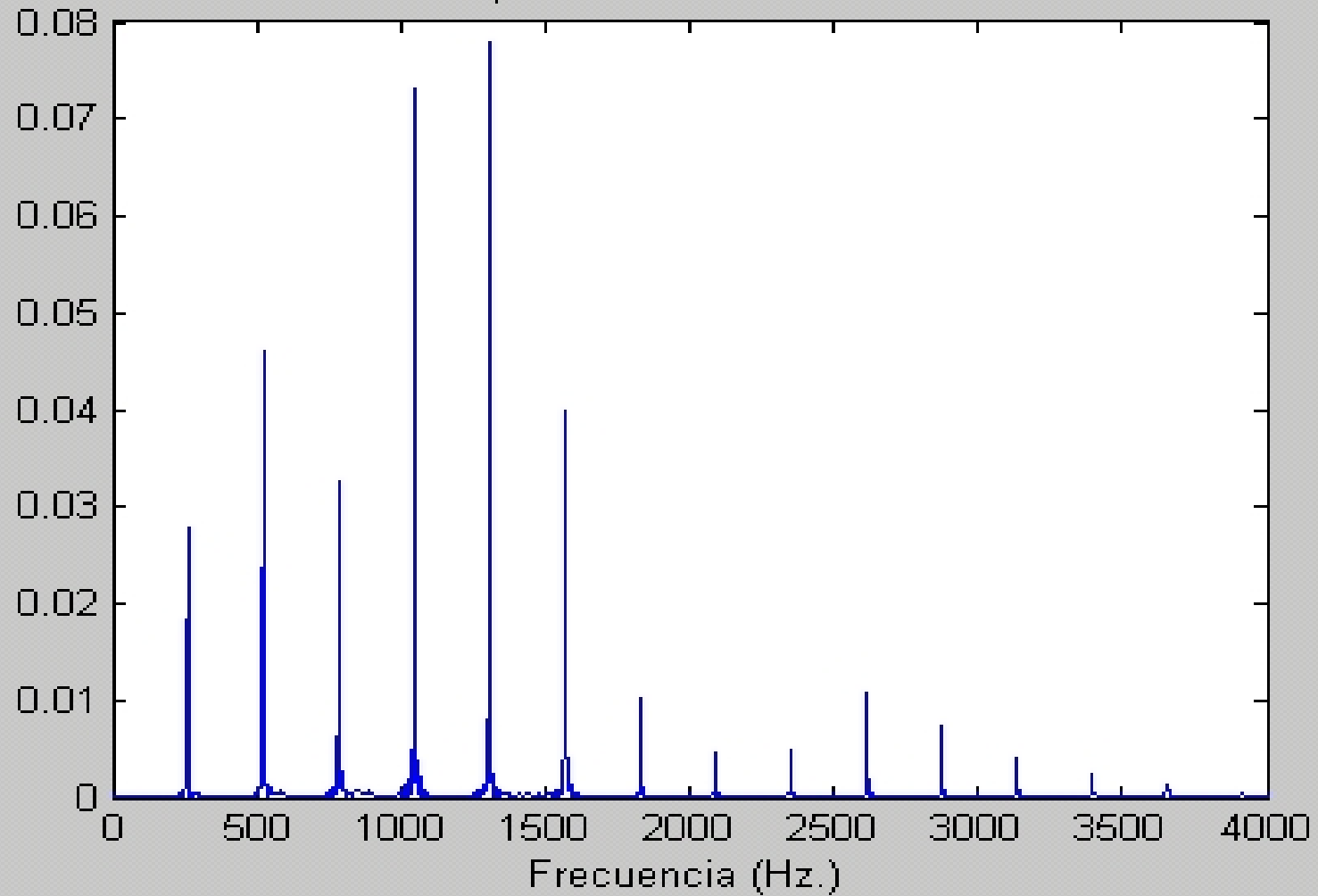
Nota musical

- Una nota musical está formada por:
 - Un sonido más grave, denominado frecuencia fundamental
 - Un conjunto de sonidos, denominados armónicos, cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental.

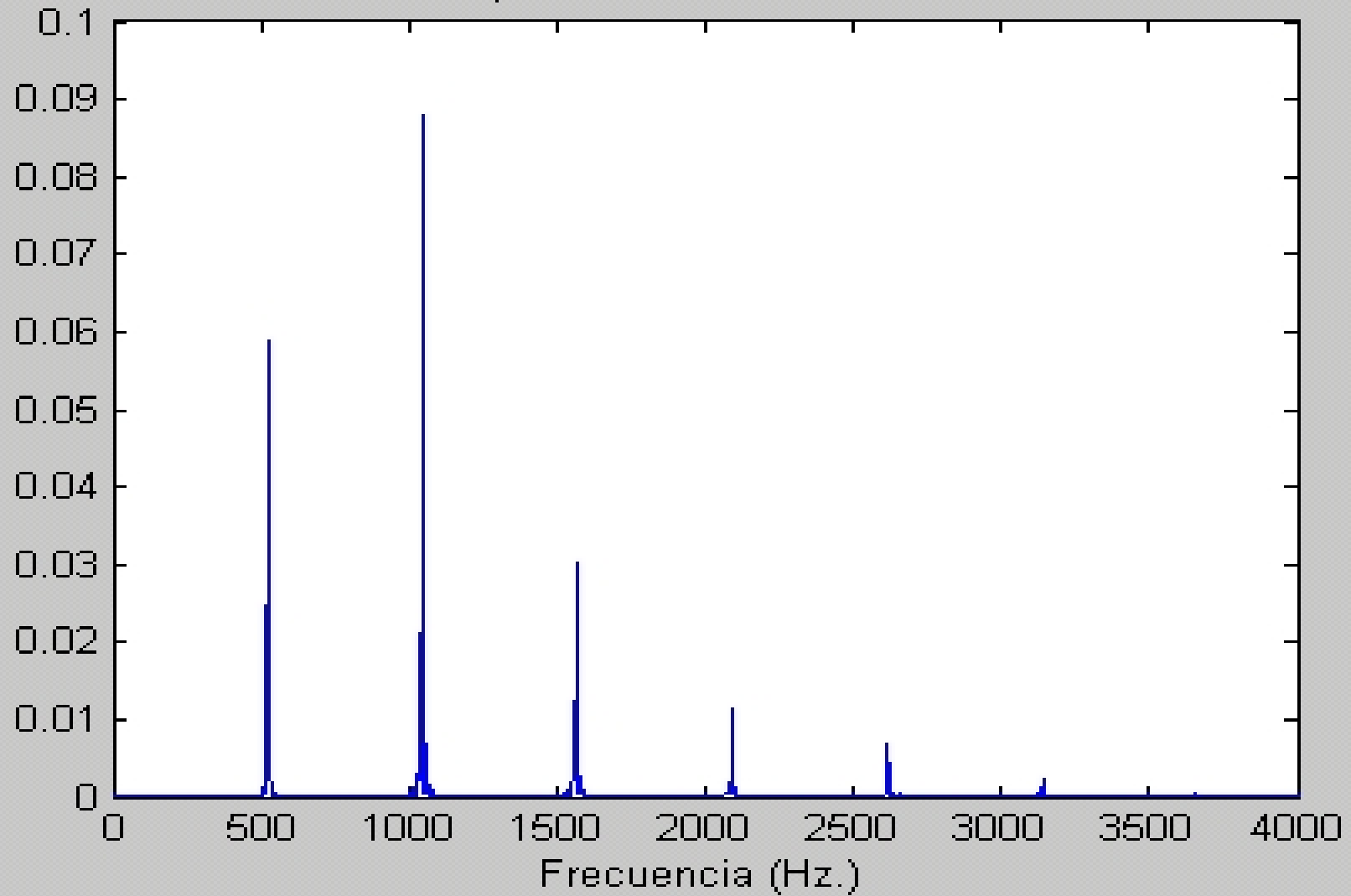
Espectro nota do de clarinete



Espectro nota do de Oboe



Espectro nota do de Flauta



- Todas tienen como frecuencia fundamental 262 Hz, luego corresponden a una nota Do de la cuarta octava.
- En el caso del clarinete, las componentes de frecuencias más importantes son la frecuencia fundamental y los armónicos 2 y 4.
- Sin embargo, para el Oboe la frecuencia fundamental no es la más importante de las componentes, sino la de 1310 Hz (cuarto armónico). Además, hay 6 armónicos y la fundamental con amplitudes bastante importantes.

- La flauta se corresponde con una nota de una octava superior, ya que su frecuencia fundamental es de 523 Hz. Además sólo hay tres componentes relativamente importantes, la frecuencia fundamental y los dos primeros armónicos. Nuevamente se produce una situación en la que la frecuencia fundamental no es la componente de mayor intensidad de la nota.

- ¿Porqué suenan diferentes si tienen la misma frecuencia?.
porque lo que habitualmente se conoce como Timbre de un sonido viene determinado por la amplitud relativa de los distintos armónicos. Es decir, un do de flauta y un do de clarinete se diferencian en la distinta amplitud de cada uno de los armónicos en ambos casos.

Disonancia

- Cuando escuchamos dos ondas sinusoidales con frecuencias muy parecidas entre sí, oímos una aspereza desagradable, denominada **disonancia**.
- A medida que la frecuencia de ambas ondas se aleja, dicho efecto disminuye hasta dejar de percibirse. La zona de frecuencias donde percibimos la disonancia se denomina **ancho de banda crítico**.
- Podemos pensar que cuando oímos sonidos podemos sintonizar una banda estrecha de frecuencias, de forma que si los componentes están más alejados que la banda crítica, los podemos oír por separado.

Disonancia

- Con el fin de conocer qué intervalos de frecuencia entre tonos puros son consonantes, debemos saber cómo varía la banda crítica con la frecuencia.
- En la mayoría de las frecuencias la banda crítica se halla entre la tercera menor y el tono entero. Para frecuencias por debajo de 440 Hz, la banda crítica es mayor. Esto no suele ser importante, ya que la mayor parte de la energía para frecuencias bajas suele estar en los armónicos altos donde el oído es más sensible.
- ¿Qué queremos decir con “tercera menor”?

Consonancia

- La consonancia se puede entender no sólo como ausencia de disonancia, sino también como “refuerzo” de los dos sonidos entre sí (en términos físicos “resonancia”).
- Algunos intervalos de frecuencia producen notas claramente consonantes y son:
 - 1:2 Octava.
 - 1:3 Octava más quinta
 - 1:4 Dos octavas
 - 1:5 Dos octavas más tercera mayor
 - 1:6 Dos octavas más quinta.

Consonancia

- En estos casos, los armónicos de la nota más alta caen en la misma posición que los de la nota más baja.
- Otros tipos de intervalos tienen distintos tipos de consonancia:
 - Octava: 1:2 1
 - Quinta: 2:3 $\frac{1}{2}$
 - Cuarta: 3:4 $\frac{1}{3}$
 - Tercera Mayor: 4:5 $\frac{1}{4}$
 - Tercera Menor: 5/6 $\frac{1}{5}$

Consonancia

- Por ejemplo, el ratio M:N significa
 - M es el cociente de la frecuencia más baja a la frecuencia divisora común.
 - Cada N armónico de la frecuencia más baja coincide con el armónico M de la frecuencia más alta.
- Ejemplo: Si la frecuencia baja es 110 Hz, y la frecuencia alta es 165 Hz, se encuentran en la relación 2:3. Es decir, 165 Hz es la quinta de 110 Hz. Cada tres armónicos de la frecuencia 110 coinciden con un armónico para de 165 (el 3 con el 2, el 6 con el 4, etc..)
 -

Consonancia de una quinta

- Quinta (2:3)

-	2	3	4	5	6
- Armónicos 110:	220	330	440	550	660
- Armónicos 165		330	495	660	
-		2	3	4	

- Cuarta (3:4)

-	2	3	4	5	6	7	8
- Armónicos 110:	220	330	440	550	660	770	880
- Armónicos 146.66	293.33	440		586	733	880	
-		2	3	4	5		6

Consonancia de una quinta

- Cada M armónicos del tono superior coinciden con un armónico N del tono inferior. Por tanto,
 - a mayor M , más armónicos del tono superior no coinciden con armónicos del tono inferior. Dichos armónicos no coincidentes pueden caer dentro de una banda crítica de un armónico de un tono inferior y por tanto, producir disonancia.
 - A menor M , se espera que ocurran menos disonancias.

Resumen

- Podemos caracterizar el sonido a partir de señales sinusoidales.
- Una señal sinusoidal pura, con una sola frecuencia se percibe por el oído entrenado musicalmente como un **tono puro**.
- Una señal **periódica** se puede descomponer como una **suma de sinusoides de frecuencias armónicas**.
- Las notas musicales deben ser periódicas para que “mantengan” la frecuencia durante cierto tiempo.
- Por tanto, las notas musicales, se podrán representar mediante sumas de sinusoides armónicamente relacionadas

Resumen

- La **serie de Fourier** es la herramienta matemática que nos permite determinar la **amplitud** de cada una de las sinusoides que componen una nota musical (señal periódica).
- Los **filtros** nos permiten **atenuar** ciertas frecuencias desagradables para el oído (por ejemplo, el paso de la cinta o de la aguja sobre un disco de vinilo) y amplificar o dejar sin modificar las frecuencias que mejor percibe nuestro oído.
- La forma más evidente de implementar un filtro es mediante la **convolución** de una señal de entrada con “la respuesta al impulso” del filtro (filtros FIR).

Resumen

- La **serie de Fourier** es la herramienta matemática que nos permite determinar la **amplitud** de cada una de las sinusoides que componen una nota musical (señal periódica).
- Los **filtros** nos permiten **atenuar** ciertas frecuencias desagradables para el oído (por ejemplo, el paso de la cinta o de la aguja sobre un disco de vinilo) y amplificar o dejar sin modificar las frecuencias que mejor percibe nuestro oído.
- La forma más evidente de implementar un filtro es mediante la **convolución** de una señal de entrada con “la respuesta al impulso” del filtro (filtros FIR).

Resumen

- Si la señal es algo más compleja no produce la sensación de tener una frecuencia determinada y se denomina “**Ruido**”. Estas señales se caracterizan por **no ser periódicas** y por tanto su espectro no está limitado a tener sinusoides armónicamente relacionadas.
- Algunos instrumentos musicales producen “ruido”, como por ejemplo, los tambores (menos el timbal), la guitarra eléctrica distorsionada, etc...
- Para analizar dichas señales, es necesario la **transformada de Fourier para señales no periódicas**.

Resumen

- Hasta ahora hemos hablado de **señales analógicas**, es decir que varían de forma continua tanto en amplitud como en el tiempo.
- Interesa almacenar y transmitir dichas señales en **formato digital**. Para ello es necesario **muestrear** la señal (discretizar el tiempo) (PAM), **Cuantificar** su amplitud (sólo puede tomar unos niveles determinados) (PCM), y **codificarla** para evitar errores en la transmisión o en la recuperación de la información almacenada.

Resumen

- Si tenemos **señales discretas**, la herramienta matemática para averiguar las sinusoides que la componen es la **Transformada Discreta de Fourier**.