

# ACÚSTICA DE LA MÚSICA

En este curso se pretende ofrecer al lector o lectora unas nociones básicas pero completas de todo lo que acontece en el mundo de la acústica de la música. Intenta ser una introducción y acercamiento suficiente para comprender el mayor número posible de fenómenos relacionados con el aspecto científico de la música.

El lector/a tiene el deber de informarse tanto como pueda sobre la materia, libros de texto y similares, para poder así contrastar la información que en este trabajo se le ofrece, que aun procurando ser lo más precisa y veraz posible, puede que no esté libre de errores.

Estos apuntes están tomados de la asignatura de Acústica Musical que impartía el profesor Jesús Alonso Moral (q.e.p.d.) en el conservatorio de Bilbao "Juan Crisóstomo de Arriaga". Jesús Alonso Moral fue fundador de la escuela de luthería de Bilbao.

El curso consta de 14 capítulos que abarcan todos los conceptos básicos, y algo más, relacionados con la materia. Veremos cuál es la naturaleza del sonido y de la música, cómo se transmite, cómo la recibimos y percibimos, cómo afecta el entorno a la transmisión del sonido, y como no, veremos cómo se ha desarrollado la música en occidente con sus escalas particulares, los problemas de afinación que surgen, etc.

La historia del desarrollo científico de la acústica, que en un principio fue únicamente musical fue ampliándose a todo el espectro de las vibraciones mecánicas en la medida en que se conocía mejor la naturaleza de estos fenómenos. Se ampliaron los estudios a los diferentes medios en los que se pueden transmitir las ondas mecánicas, apareciendo ramas de la acústica como la subacuática, acústica arquitectónica, etc.

El hecho de comprender que los sonidos no son más que vibraciones transmitidas en un medio mecánico, aire, agua, madera, etc. nos puede hacer ver lo inmenso que puede ser este campo de investigación y lo relacionado que está con otros fenómenos diferentes de la música que tenemos muy cerca y que percibimos a diario.

¿Se podría llegar a decir que el sonido de un riachuelo es música? Lo que al menos si es cierto es que tiene mucho que ver con la acústica y esto es lo que estudiaremos en este curso.

## 1. INTRODUCCIÓN

- .Acústica de la Música. Combinación de ciencia y música.
- .Objeto de estudio. La cadena musical.
- .Metodología y medios empleados en la investigación de la AM.
- .Proceso histórico. De Pitágoras al siglo XXI.

## 2. MOVIMIENTOS VIBRATORIOS

- .Movimiento vibratorio armónico simple (m.v.a.s.).
- .Principio de superposición.
- .Teorema de Fourier. Movimiento vibratorio periódico complejo (M.V.P.C.)
- .La serie armónica natural.
- .Los armónicos: consecuencias de interés musical.
- .Movimiento vibratorio amortiguado.
- .Movimiento vibratorio forzado.
- .Modelo físico del instrumento musical.

## 3. CONCEPTOS BÁSICOS UTILIZADOS EN ACUSTICA MUSICAL

- .Sonido y Ruido. Características físicas y perceptivas.
- .Efecto del ruido en la vivencia de continuidad la altura de tono.
- .Frecuencia y la vivencia de la altura de tono.
- .Amplitud de la presión sonora y vivencia de la sonoridad.
- .Umbral de audición y umbral de dolor.
- .Percepción de la presión sonora: FON.
- .Fuerza sonora: SON.

## 4. PROPIEDADES PSICOACUSTICAS

- .Altura de tono e intensidad sonora.
- .Umbral de discernibilidad para la altura de tono.
- .Condiciones de duración para las señales acústicas y la vivencia de la altura de tono.
- .Principio de indeterminación.
- .Umbral de discernibilidad para el nivel sonoro.
- .Pulsaciones y sonidos diferenciales
- .Constante de tiempo del oído.
- .Enmascaramiento. Consideraciones de interés musical.

## 5. LAS ESCALAS MUSICALES EN LA TEORÍA Y EN LA REALIDAD

- .Introducción.
- .El diapasón.
- .Sistema generativo de Pitágoras.
- .Sistema de Aristógenes-Zarlino.
- .La escala según el sistema de Holder.
- .Temperamento mesotónico de 1/4 de coma.
- .Temperamento mesotónico de 1/6 de coma.
- .Sistema equitemperado o igual.
- .Temperamentos desiguales.
- .Causas y exigencias para la construcción de escalas. Ventajas e inconvenientes.
- .Posibles desarrollos en las escalas.
- .Concepto del CENT.

## 6. CONSONANCIA Y DISONANCIA

- .Coincidencia de armónicos en intervalos musicales.
- .Anchura crítica de banda ACB.
- .Variación de la consonancia dentro de la ACB.
- .Evaluación de la consonancia.
- .Enmascaramiento temporal.

## 7. RESONANCIAS

- .Definición de resonancia.
- .Masa efectiva y rigidez efectiva.
- .Frecuencias de resonancia. Admitancia de entrada y función de transferencia.
- .Formas generales de excitación de resonancias: mantenidas e instantáneas.
- .Caracterización física y perceptiva de las resonancias.
- .Revisión del modelo físico de los instrumentos musicales.
- .Acoplamientos.

## 8. TIMBRE

- .Concepto de timbre.
- .Régimen transitorio.
- .Formantes de la voz.
- .Espacio de timbres.

## 9. MOVIMIENTO ONDULATORIO

- .Ondas transversales y longitudinales
- .Caracterización de las ondas: velocidad de propagación, longitud de onda, número de onda, periodo, frecuencia, amplitud.
- .Propagación del sonido en el aire
- .Perturbación de las ondas sonoras por los objetos.
- .Efecto Doppler.
- .Reflexión, refracción, absorción, difusión y dispersión.
- .Ondas estacionarias. Interferencias

## 10. OIDO Y AUDICIÓN

- .Oído externo: función acústica.
- .Oído medio: transformación acústico-mecánica.
- .Oído interno: análisis de Fourier.
- .Teorías de la Localización y la Periodicidad.
- .Actividad de los hemisferios cerebrales.

## 11. ILUSIONES MUSICALES

- .Fusión, fisión y coherencia temporal.

## 12. ELEMENTOS DE ACUSTICA DE SALAS

- .Exigencias para la buena acústica de una sala.
- .Eco y reverberación. Tiempo de reverberación.
- .Sensación de sonido directo.
- .Dirección de radiación de instrumentos musicales.
- .Claridad, tiempo de decaimiento primario EDT, tiempo de elevación ET, índices de inversión.
- .Ejemplos de salas de conciertos
- .Mejora de condiciones y adecuaciones acústicas de las salas.

## 13. CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES

- .Instrumentos musicales de cuerda: percutida, pulsada y punteada
- .Instrumentos musicales de viento: embocadura, lengüeta y boquilla
- .Instrumentos musicales de percusión: barras, placas, membranas

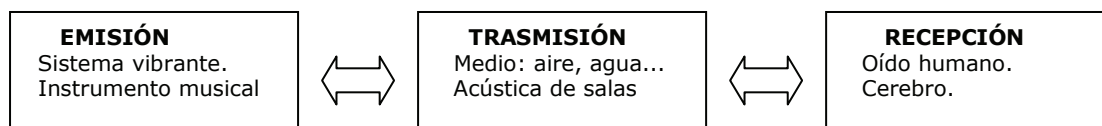
## 14. INTRODUCCIÓN A LA ELECTROACÚSTICA

- .Sistemas mecánicos de almacenamiento de la señal. Comienzo histórico
- .Sistemas magnéticos de almacenamiento y reproducción
- .Transductores acústicos
- .La era digital. Almacenamiento de datos y convertidores: DAC y ADC

# 1. INTRODUCCIÓN

## Acústica de la Música. Combinación de ciencia y música

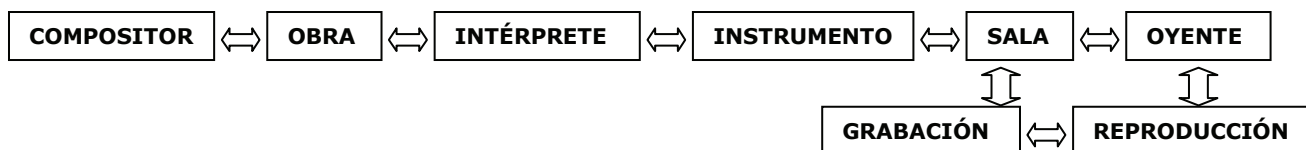
La Acústica de la Música es la ciencia que estudia la naturaleza del sonido y de la música. La audición de un sonido está ligada a vibraciones. Las ondas mecánicas que estudiaremos en este curso son necesarias para que se produzca la comunicación sonora. Las vibraciones se producen en el instrumento (objeto elástico) y se propagan a través del medio mecánico, también elástico (aire, agua...). Existe una captación de estas ondas por parte del oído, después son transmitidas al cerebro y éste interpreta los datos produciendo una vivencia musical.



La Acústica de la Música ha sido desarrollada por científicos con interés musical y músicos con interés en el método científico. Es una rama de la Acústica, que pertenece a la Física y ésta a las ciencias de la naturaleza. Podemos incluir también a la A.M. Dentro de la musicología, por lo que se refiere a la psicoacústica, que está dentro de las ciencias humanísticas. La A.M. tiene trabajos sobre mecánica vibracional y sobre percepción y respuesta del ser humano.

## Objeto de estudio. La cadena musical

Si consideramos todo lo que está relacionado con una vivencia musical podemos desarrollar una cadena en la que tendremos como primer eslabón al compositor por el papel que le corresponde, después la obra, el intérprete, instrumento, sala, oyente y se pueden añadir cadenas como la grabación y reproducción de la obra.



Entre los diferentes eslabones existe una interacción. Dependiendo del tipo de obra tendremos diferentes salas más o menos adecuadas para su ejecución. Existen salas, como catedrales, iglesias, etc. que no admiten cualquier tipo de obra. Si conseguimos un instrumento concreto con su sonoridad y determinadas características puede comenzar la cadena en el instrumento. Se puede adaptar y componer una obra para un intérprete o para un instrumento concreto, etc.

## Metodología y medios empleados en la Acústica de la Música

El método es un procedimiento científico para intentar comprender mejor los fenómenos que nos rodean y transmitirlos a las sucesivas generaciones. Mediante el análisis y la síntesis se han llegado a comprender y conocer gran cantidad de fenómenos. Otros hallazgos surgen de forma genuina, intuitiva, fortuita, casual, etc.

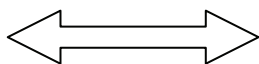
Supongamos que queremos mejorar un instrumento musical, mejorar ciertos armónicos, etc. Analizamos el instrumento original desmenuzándolo en el mayor número de partes posibles, investigamos éstas por separado y después hacemos la síntesis, reconstruimos el nuevo instrumento supuestamente mejorado. Habrá que tener en cuenta, como no, la interrelación que existe entre las diferentes partes del instrumento. Mediante esta espiral de análisis-síntesis se ha avanzado mucho en la acústica. Se analiza un proceso musical, se extraen conclusiones y sintetizamos después la obra. En estos procesos es muy importante la experimentación. Prácticamente toda la investigación es experimental.

Los conceptos de los que partimos y a los que tenemos acceso directo son puramente musicales o vivenciales. Un concepto musical que vivenciamos nosotros es la **altura de tono**, y podemos plantearnos por qué un tono es más agudo o alto que otro, entonces aparece el concepto físico de frecuencia que tiene que ver con el nº de veces que vibra el sistema por segundo. La **sonoridad** es otro concepto vivencial que está ligado al concepto físico de presión sonora y amplitud de la onda. Por último tenemos el **timbre** como tercer concepto vivencial que define una nota musical y lo relacionaremos, entre otros conceptos físicos, con la distribución de armónicos. La altura de tono es un concepto que expresa una vivencia personal, la frecuencia, en cambio, es un concepto físico medible sin necesidad de vivencia propia.

Un sonido queda así definido con estas tres características o conceptos vivenciales, cada uno de los cuales tiene su explicación mediante su correspondiente concepto físico.

### Conceptos vivenciales

Altura de tono  
Sonoridad  
Timbre



### Conceptos físicos

Frecuencia  
Amplitud, Presión sonora  
Distribución de armónicos, etc.

Es importante señalar que existen notables diferencias entre lo que percibimos y lo que se puede medir en un sistema. Los conceptos tendrán puntos de unión común así como divergencias que veremos a lo largo del curso.

Los medios para el análisis empleados en acústica son micrófonos, acelerómetros o detectores de vibraciones, martillos transductores, etc. conectados a un analizador de espectro. Los sistemas, como veremos, se pueden describir en el espacio de tiempos o en el espacio de frecuencias, ambos perfectamente válidos, aunque la mayoría de los estudios en nuestro caso los haremos en el espacio de frecuencias ya que éste nos ofrece datos más comprensibles sobre la naturaleza de cada sonido que analizamos. Cada espacio tendrá sus ventajas y sus inconvenientes.

Existe un aparato de medida muy importante a tener en cuenta que es el oído. Conviene contrastar y ver si los hechos que estudiamos van bien al oído humano ya que es al fin y al cabo el receptor último de todo lo que estudiamos en acústica.

### Proceso histórico. De Pitágoras al siglo XX

Nos remontamos al siglo V a.c. en el que Pitágoras y su grupo recorrió todos los caminos tanto terrestres como del saber y el conocimiento. Este señor fundó una secta que sin ser religiosa fue científica. El grupo tenía gran interés por las matemáticas (esencia del universo) pero también por la música. Hicieron experimentos con las relaciones de longitud de la cuerda, tensión, etc. y los sonidos que provocaban. Los sonidos agradables entre si o armónicos estaban relacionados de forma matemática sencilla.

Entre otros tantos nos encontramos con Aristógenes (350 a.c.) quien desarrolló un sistema de escalas, así como Eratóstenes que también hizo sus juegos algorítmicos y escalas y además de esto el tipo era campeón olímpico y geógrafo. Como casi todos los griegos, sabía de todo.

Podemos centrarnos en el siglo XVI con Zarlino (1517-1590) un compositor italiano y teórico musical preocupado por las escalas musicales. Retoma ideas de Aristógenes y desarrolló el sistema de escalas que se conoce por su nombre: Aristógenes-Zarlino.

Se da un salto cualitativo con Galileo-Galilei (1564-1642) en la investigación sobre acústica. Este personaje revolucionó el pensamiento científico con su mecánica y su astronomía. Su padre era un buen músico de la época y Galileo se planteó la cuestión de la altura de tono, de qué dependía la vivencia que se siente, y vio como tenía relación con el número de vibraciones por segundo del sistema que vibra. Cuantas más vibraciones por segundo mayor es la altura de tono.

Marin Mersenne (1588-1648) era un vendido a la iglesia y no tuvo problemas como el "hereje" de Galileo. Era matemático, naturalista, etc. Profundizó en los fenómenos vibratorios de cuerdas. Construyó cuerdas largas y gruesas con tensión, longitud, densidades diferentes y pudo contar las vibraciones. Al final dio con la fórmula que relaciona la vibración de las cuerdas con su longitud, tensión, etc. Se consiguió la relación entre frecuencia y altura de tono.

Robert Hooke (1635-1703) reprodujo las experiencias de Mersenne y siguió investigando en la frecuencia y altura de tono. Joseph Saveur (1653-1716) se mete en el estudio del timbre y encuentra la existencia de los armónicos, no se genera un solo sonido sino que acompañan a éste sus octavas, quintas, etc. Aparece el concepto de timbre.

Lagrange (1736-1813) dotó a la ciencia de unas herramientas matemáticas para trasladar al papel todas las vibraciones, incluidas las sonoras.

Ernest Chladni (1756-1824) descubrió un sistema muy práctico para ver como vibran las tapas de las cajas acústicas de resonancia de los instrumentos: los diferentes modos de vibración y sus frecuencias. Con arena fina y un arco como excitador consiguió dibujar las líneas nodales de las placas, Fig.1. La arena se queda quieta en las líneas de vibración nula y salta en las zonas en las que existe vibración.

Fourier (1768-1830) consiguió establecer una relación de las vibraciones entre el espacio de tiempos y el espacio de frecuencias, Fig.2.

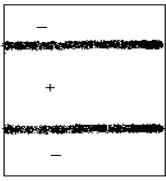


Fig. 1

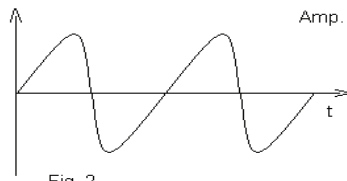
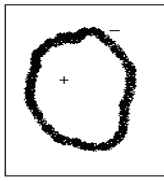
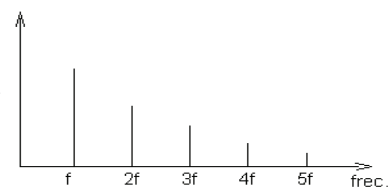


Fig. 2



Felix Savart (1791-1841) fue un importante personaje de la época, fundador del electromagnetismo, también hizo grandes cosas en acústica musical. Le impresionó la sonoridad de los violines Stradivari, Guarneri, etc. Quería tapas sueltas y fue donde J.B. Villaume (1798-1875) uno de los mejores luthieres que retocaron los violines Stradivari y Guarneri para darles más sonoridad. Savart experimentó con estos violines y con el método de Chladni vio que en los buenos violines aparecía un modo de vibración con forma de anillo, Fig.1, que no aparecía en los violines normales. Villaume falsificó sus violines y los hizo pasar por Stradivari después de afinar las tapas. Savart pensó en construir un violín de líneas más sencillas con forma trapezoidal. Fue un invento curioso, aceptable, con juicios favorables aunque no ha pasado a la historia. Convenció a Villaume para construir un contrabajo en su justa medida y sonaba mejor aunque era tan grande que para tocarlo hacían falta dos personas y el instrumento quedó en desuso.

Helmholtz (1821-1894) es considerado como el padre de la acústica moderna. Fue físico, fisiólogo, médico, etc. y músico. Fundó la óptica fisiológica. Conectó los armónicos con las vivencias cerebrales. Contribuyó con muchos avances a la psicoacústica. En función de los armónicos describió el timbre de los instrumentos, también estudió sobre la influencia de las disonancias en el cerebro.

Lord Rayleigh (1842-1919) es el padre de la acústica moderna, para los ingleses. Raman, un hindú de la colonia británica muy dotado para la ciencia como tantos otros hindúes, una vez licenciado en física, se enamoró de los instrumentos de arco. Le interesó la interacción arco-cuerda y cuerda-tapa vía puente y desarrolló un sistema mecánico para tocar el violín y llegó a descubrir la nota del lobo, un acoplamiento muy fuerte entre cuerda y tapa.

Saunders, el cual murió hace unos años, empezó como físico de renombre y después se pasó a la música. En cuanto pudo transformó su laboratorio de Harvard en uno adecuado para investigar los instrumentos de cuerda. Hizo estudios sobre cajas acústicas de resonancia, la respuesta a ciertas frecuencias, resonancias de la madera, de la cavidad de aire, etc. Conoció al violinista J. Heifetz, ilustre en esa época, quien se interesó por los descubrimientos del científico y entre gira y gira se acercaba al laboratorio de Saunders para analizar los buenos violines que tenía. Conectar los parámetros físicos con la calidad tonal del instrumento era un interés común a los dos. Los buenos violines tienen la resonancia de aire próxima al RE del violín y la resonancia de la madera cerca del LA. Saunders fundó la *Catgut Acustical Society* medio en bromas y ahora tiene ya socios en todo el mundo y en todos los campos de la acústica.

Entre los discípulos y discípulas de este señor está Carlin Hutchins que siguió investigando sobre la acústica del violín y sobre la construcción hasta pasados los noventa años. Empezó como bióloga pero se interesó por la viola y se cambió. Con Saunders en el laboratorio aprendió acústica y con Saconi y otros Luthería. Construyó una familia de 8 instrumentos de cuerda y arco siguiendo los criterios de Saunders. Hizo buenos violines, comparados incluso con los Stradivari. Al método de Savart se le denomina ahora de Hutchins pues esta señora lo mejoró. Después de Stradivari y Guarneri no se han construido instrumentos que superen en calidad de sonido a los que hicieron en su día estos grandes maestros, se han copiado bien pero nada más. Esta persona ha marcado ejemplo con la calidad de sus instrumentos.

Johan Sundberg investigó en el real instituto de tecnología de Estocolmo, en el departamento de acústica. Gunar Fant investigó sobre la voz humana, hizo síntesis mecánicas de voz y electrónicas. Sundberg hizo el doctorado sobre tubos de órgano, estudió canto y adaptó las investigaciones de Fant a la voz humana. Descubrió el formante de los cantantes. Vio como los buenos cantantes acentúan y agrupan los formantes (resonancias) de la voz alrededor de 3000 Hz., frecuencia a la cual la orquesta tiene un decaimiento y se les puede oír bien a ellos. A los violines solistas les pasa algo parecido. Sundberg junto con el violinista Lars Friden y otro sueco, Askenfelt, investigaron sobre la musicalidad. La voz es el instrumento más utilizado y la musicalidad tiene mucho que ver con la voz humana ya que el oído está perfectamente y permanentemente adaptado a ella.

Manfred Clynes en Sydney ha desarrollado trabajos sobre musicalidad, expresividad en la ejecución, etc. Es un concertista de piano con mucho interés científico. Hay gran diferencia entre la potencia de comunicación de unos y otros. Describió dinámicas diferentes para cada emoción. Se fue con los aborígenes australianos a estudiar las respuestas emocionales

ante las diferentes dinámicas y vio que no eran muy diferentes al resto del mundo "culto". Existen características muy concretas inherentes a la biología humana.

Flecher y Pollard también en Australia investigaron sobre tubos de órgano y sobre piano respectivamente. Lotar Cremer catedrático de mecánica en Berlín, una de las principales autoridades del siglo estudió sobre acústica de salas y demás. Jurgen Meyer sigue la línea de Cremer con acústica de salas. La sala de la filarmónica de Berlín la adecuaron estos dos tipos.

Eric Janson en Suecia ha investigado sobre guitarras y violines, acústica de salas, piano, viento, etc. con Benade en Cliveland. Investigó con métodos propios de manera excepcional. Benade llevo por algún tiempo las tesis de Janson. Fundo en Cliveland un grupo de trabajo con una metodología moderna. Janson y Jesús Alonso desarrollaron en Suecia un método de medida de la admitancia de los instrumentos musicales.

T Rossing catedrático de física de la universidad de Decals, investigó sobre percusión y tantas otras cosas mas. Últimamente dedica su tiempo a la investigación sobre campanas.

G Weinreich en la universidad de Michigan investiga sobre música, acústica, pianos, arco, etc. y muchos investigadores más.

## 2. MOVIMIENTOS VIBRATORIOS

### Movimiento vibratorio armónico simple (m.v.a.s.)

Los sonidos tienen su origen en vibraciones. Para que exista la señal acústica necesitamos un sistema que induzca la vibración. Este sistema ha de ser elástico, esto es, que tenga una rigidez y capacidad suficiente como para poder recuperar la posición de equilibrio ante un desplazamiento producido por una fuerza exterior. El sistema oscilante genera compresiones y depresiones en la materia o medio que lo rodea. Las señales acústicas se propagan a través de este medio mecánico y elástico (aire, agua, madera, etc.) y son estas variaciones de presión las que llegan a nuestro oído y activan todo el complejo auditivo. Un oído humano sano es capaz de reaccionar a frecuencias comprendidas entre 16 y 20000 oscilaciones por segundo. Por debajo de estos 16 hz. tenemos los infrasonidos y por encima de los 20000 hz. están los ultrasonidos que, aunque no los percibamos, son vibraciones que para bien o para mal nos afectan.

Los instrumentos musicales son sistemas idóneos para producir estas vibraciones. Estos instrumentos tienen características especiales para producir y transmitir lo que el músico quiere expresar.

A partir de un punto de equilibrio se produce un movimiento periódico. Si es muy complejo lo intentaremos expresar en términos más sencillos. Se buscan unas vibraciones básicas elementales y se construyen todas las demás a partir de estas.

El m.v.a.s. es la base para cualquier vibración periódica. Suponemos el giro de una partícula alrededor de una circunferencia. La proyección de este punto en el eje vertical puede representar la oscilación de una masa acoplada a un muelle. Si representamos esta oscilación en el tiempo aparece lo que conocemos como la función trigonométrica sinusoidal o **armónico**. En la figura 4 tenemos la representación en el tiempo y en frecuencia de un armónico de frecuencia  $f_1$ .

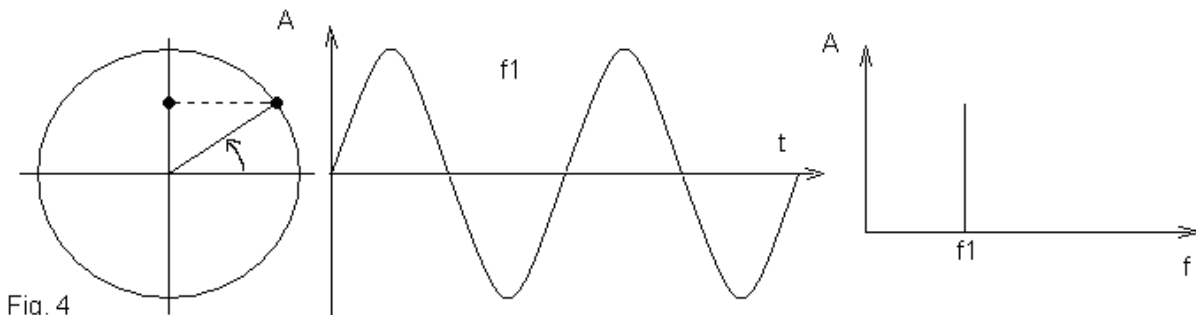


Fig. 4

En este caso, una vibración completa viene dada por el **periodo**  $T$  que definimos como el tiempo que tarda el sistema en completar un ciclo. La **frecuencia** será el número de oscilaciones que realiza el sistema en una unidad de tiempo: un segundo. La frecuencia es el inverso del periodo:  $T=1/f$ . Podemos decir también, en este caso, que el sistema está produciendo un sonido o tono puro. Los instrumentos musicales generan vibraciones mucho más complejas que ésta, pero con unas cuantas de estas señales sinusoidales se podrán componer de manera satisfactoria todas las demás.

Dependiendo de las oscilaciones que se produzcan en un segundo el sonido emitido tendrá una altura de tono determinada, que como vimos, es una vivencia personal. La magnitud física asociada es la frecuencia, que medimos en hercios (hz.) magnitud inherente a cualquier vibración, la percibamos o no. Cuanto mayor sea la frecuencia del sistema mayor será la altura de tono.

Llamamos **amplitud** de onda al máximo desplazamiento respecto del punto de equilibrio. La **elongación** es el desplazamiento en un instante determinado. La **sonoridad** es otra vivencia nuestra cuyo concepto físico asociado es la amplitud de la vibración y como consecuencia la **presión sonora** producida. El sistema más sencillo que podamos imaginar capaz de producir oscilaciones es el compuesto por una masa acoplada a un muelle con una rigidez dada. En este sistema la frecuencia viene determinada únicamente por la masa y la rigidez del muelle: cuanto mayor es la rigidez mayor es la frecuencia y cuanto menor es la masa asociada mayor es la frecuencia. Hay que señalar que en este sistema sencillo la masa y la rigidez están desacopladas, lo que quiere decir que podemos modificar una característica sin que varíe la otra. En la madera esto no ocurrirá.



Nos interesa mucho controlar la frecuencia de los diferentes sistemas que serán los instrumentos musicales, en nuestro caso: cuerdas, tubos, membranas, etc. la frecuencia la definen la geometría, masa y rigidez o tensión de las partes que son susceptibles de vibrar. Cuanto mayor sea la tensión mayor será la frecuencia y cuanto menor sea la longitud del tubo o cuerda tendremos mayor frecuencia. En las cuerdas la masa actúa en la misma dirección que en el sistema muelle-masa, cuanto menos masa tenga una cuerda mayor frecuencia nos dará.

### Principio de superposición

Este principio nos dice que dos ondas cualesquiera con las que trabajaremos se comportan de forma lineal, esto es, las podremos sumar en caso de que confluyan en algún punto del espacio. Dos ondas que viajan a lo largo de una cuerda en sentidos opuestos, si se cruzan, sumaran sus amplitudes.

Dos ondas sinusoidales de frecuencia  $f_1$  y  $f_2$  se suman y nos da una onda resultante que será un movimiento vibratorio periódico complejo M.V.P.C. Tendremos en cada punto la suma de las dos ondas. La nueva frecuencia de la onda resultante será  $f_0$  y para cualesquiera dos ondas de frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  la onda resultante tendrá una frecuencia dada por:

$$f_0 = \frac{(f_2 - f_1)}{(m - n)}$$

donde  $m$  y  $n$  son números enteros e indivisibles entre si tal que  $f_2/f_1 = m/n$ .

Podemos ver como ejemplo el caso en el que las frecuencias de las dos ondas sean  $f$  y  $2f$ , donde  $m=2$  y  $n=1$ , entonces la frecuencia resultante será igual a  $f$ :

$$f_0 = (2f - f)/(2 - 1) = f$$

Para  $f$  y  $3f$  la suma nos queda:  $f_0 = (3f - f)/(3 - 1) = f$

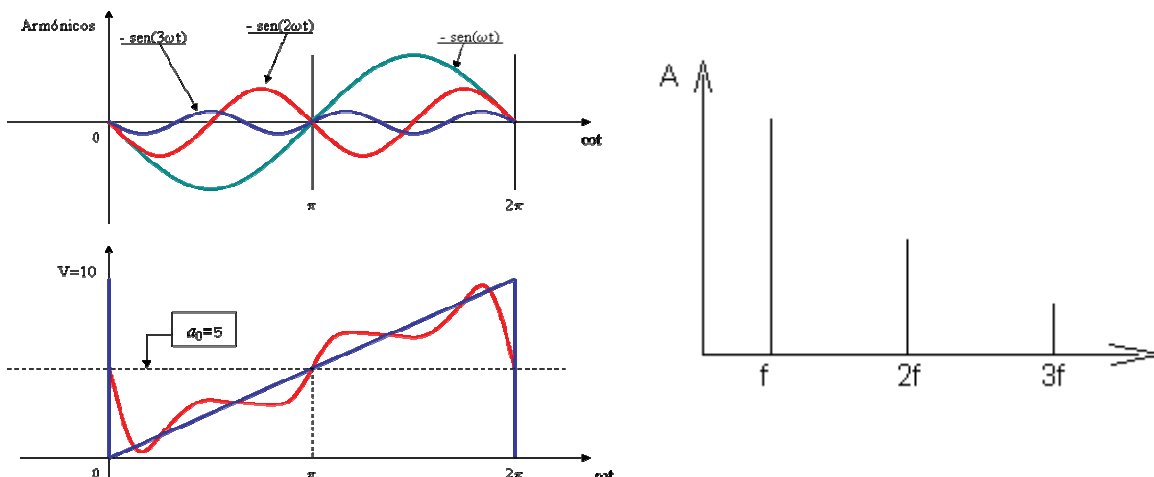
Para  $2f$  y  $3f$ ,  $m=3$  y  $n=2$ , la suma nos da algo sorprendente:  $f_0 = (3f - 2f)/(3 - 2) = f$  una frecuencia que es la mitad de la más baja de las frecuencias escogidas.

### Teorema de Fourier

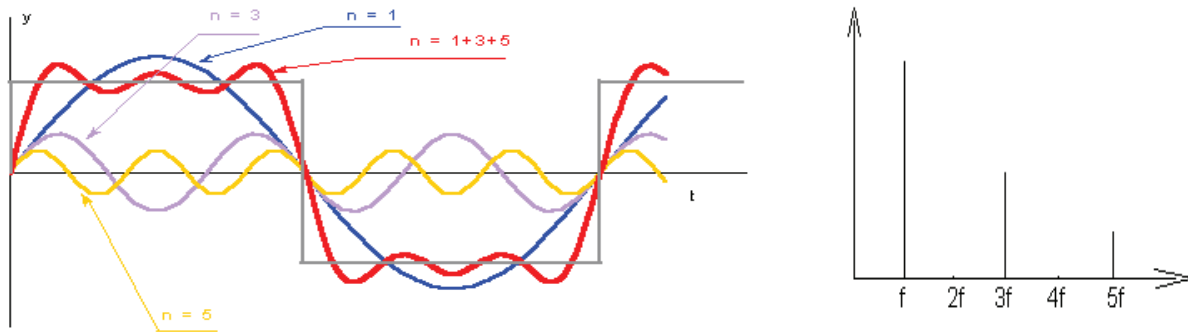
Este teorema se refiere a los movimientos vibratorios periódicos complejos M.V.P.C. La periodicidad de las señales es lo que hace que las percibamos con una altura de tono definida. Nuestro cerebro percibe una altura de tono definida si al tímpano llega una secuencia periódica de pulsos o variaciones de presión. Hace falta una periodicidad en la señal para tener una altura de tono definida.

Si tenemos un M.V.P.C. de frecuencia  $f$  siempre es posible descomponerlo en una suma de m.v.a.s. de frecuencias  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$ ,  $6f$ , etc. y de amplitudes variables de forma que sumados todos nos den el M.V.P.C. Podemos ver dos ejemplos de análisis de Fourier en la onda de diente de sierra y la onda cuadrada.

Onda de diente de sierra:



Onda cuadrada:



Cada sonido musical producido por un instrumento se compone de una serie de sonidos. Estos sonidos son las diferentes formas naturales de vibrar de ese instrumento o fuente (cuerdas) y en muchos casos, afortunadamente, se asemejan a lo que denominamos serie armónica natural. Para cada **frecuencia fundamental**  $f$  existen todos sus múltiplos, o unos cuantos de ellos, cuya suma nos da una función en el tiempo de forma compleja y **periódica** de frecuencia  $f$ . Por este motivo es más fácil comprender y analizar la señal si utilizamos la representación en el espacio de frecuencias. En esta representación aparecen desglosados todos los armónicos de los que se compone la señal o sonido complejo. La representación en el espacio de tiempos nos da información de como evoluciona la señal, su transitorio de ataque y decaimiento, amplitud de la onda, etc.

### La serie armónica natural

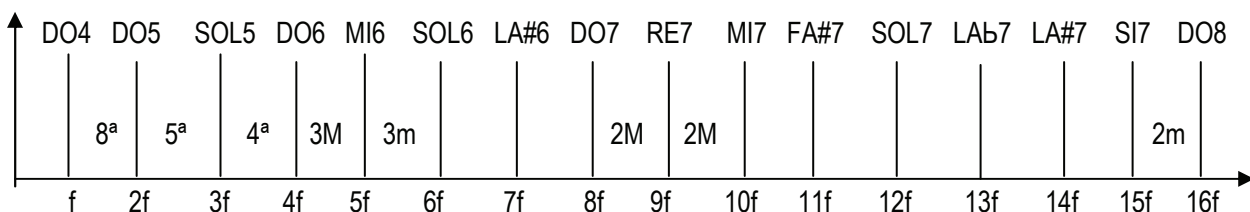
Una señal periódica es una serie armónica, podemos decir que son lo mismo solo que la señal periódica la representamos en el espacio de tiempos y la serie armónica en el espacio de frecuencias. Tendremos para toda señal periódica un primer armónico fundamental de frecuencia  $f$  que nos da la vivencia de la **altura de tono** y todos los demás armónicos **múltiplos** de esa frecuencia fundamental que refuerzan la sensación de altura de tono:

$$f, 2f, 3f, 4f, 5f, 6f, 7f, 8f, \dots, 81f, \dots, 300f, \dots$$

Cualquier sonido será una combinación de estos armónicos. El oído es capaz de discernir los diferentes armónicos, realiza el análisis de Fourier, y el cerebro se queda con el fundamental para calcular la altura de tono. El resto de los armónicos refuerzan la sensación de altura de tono y nos darán el timbre característico del instrumento. Existen casos especiales de oídos muy finos y acostumbrados que pueden llegar a detectar hasta cinco armónicos en una nota o sonido. Puede ocurrir que el fundamental tenga amplitud nula y aun así la altura de tono que vivenciamos sea la de ese supuesto fundamental (sonidos diferenciales).

### Los armónicos. Consecuencias de interés musical

Vamos a poner etiquetas o nombres a los diferentes armónicos de la serie armónica natural:



Cualquier nota que podamos obtener de un instrumento nos vale como ejemplo. Podemos experimentar la existencia de los armónicos en cualquier cuerda, una guitarra, violín, arpa, piano, etc. Supongamos que damos un DO4, esta será la frecuencia fundamental. Si somos capaces de escuchar el segundo armónico –rozando la cuerda justo en la mitad mientras se pulsa- vemos como es una octava del DO4: el segundo armónico será el DO5.

-El tercer armónico que escuchamos, rozando a un tercio la cuerda y pulsando, es una 5ª justa del DO5, nuestro  $3f$  es el SOL5.

-El cuarto armónico 4f corresponde a otra octava superior del DO5, en nuestro caso el DO6. Podemos concluir entonces que multiplicando por dos la frecuencia de una nota conseguimos una octava ascendente y dividiendo por dos una frecuencia obtenemos una octava descendente.

-El intervalo que existe entre el cuarto armónico y el quinto es una 3ª Mayor, de DO6 pasamos a MI6.

-El sexto armónico 6f es el doble de 3f por lo que será una octava de este: SOL6.

-Una octava del 4f es el 8f, el doble de frecuencia, por lo que el octavo armónico es el DO7.

-El 9º armónico es el triple del 3f y esta relación es la misma que existe entre f y 3f por lo que observando el intervalo entre estos dos podemos deducir el que hay entre 3f y 9f que será una 8ª más una 5ª, una 12ª, tenemos para este 9º armónico un RE7.

-El 10f es el doble de 5f luego será un MI7.

-Tenemos para el 12f lo mismo respecto del armónico 6f: SOL7.

-El 15f es el triple de 5f y aplicamos la misma norma de la 12ª luego para el 15f tenemos un SI7.

-El último de los armónicos que representamos aquí es el 16f que es la octava del 8f.

-Las demás etiquetas las ponemos por aproximación. Disponemos únicamente de 7 etiquetas, DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI y sus alteraciones y en la serie armónica natural aparecen algunos intervalos que no corresponden a ninguno de los que conocemos en la música occidental.

Entre el 6f y el 7f tenemos un intervalo que es un poco más pequeño que una 3m pero no llega a ser una 2M y encontramos que en la notación musical occidental no existe nada parecido a esto. Elegimos como nombre para ese armónico la nota musical más cercana LA#6.

Este sistema no es muy válido pues en los armónicos muy superiores aparecen cosas raras como que los armónicos 80f y 81f tienen la misma etiqueta. Esta situación surge de la necesidad de ponerle nombre a toda la serie armónica.

En realidad la serie armónica natural es un fenómeno de la naturaleza que aparece en las cuerdas: son sus **modos de vibración**, y que vio Pitágoras por primera vez en sus estudios sobre los fenómenos acústicos. Él y sus discípulos experimentaron con cuerdas de longitudes y tensiones variables. Vieron como una cuerda con una longitud y tensión determinadas puede producir una serie de sonidos armónicos que podemos escuchar pulsando la cuerda y rozando con un dedo en puntos que dividen la cuerda en partes iguales, 2, 3, etc. Estos sonidos, armónicos 2º y 3º, eran para Pitágoras muy agradables al oído cuando sonaban al unísono por lo que decidió, tomando también los conocimientos que llegaron de oriente, que la música compuesta habría de basarse en el intervalo que surge de estos armónicos, la 5ª justa. Las frecuencias de los sucesivos armónicos que da una cuerda siguen casi exactamente los criterios de la serie armónica natural con frecuencias múltiplo de una frecuencia fundamental. Las resonancias o modos de vibración de cualquier sistema que vibre se llaman propiamente **parciales** y serán llamados **armónicos** únicamente cuando cumplan la propiedad de **multiplicidad** respecto de la frecuencia fundamental. Si tenemos la fortuna de disponer de un sistema cuyos modos de vibración se ajustan a la serie armónica natural tendremos una altura de tono muy definida, que es precisamente lo que necesitamos para hacer música. Los armónicos que acompañan a la fundamental refuerzan la vivencia de la altura de tono percibida.

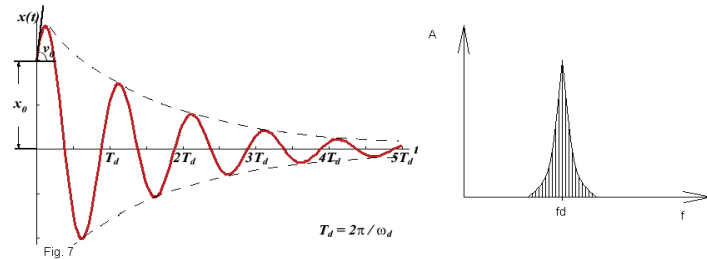
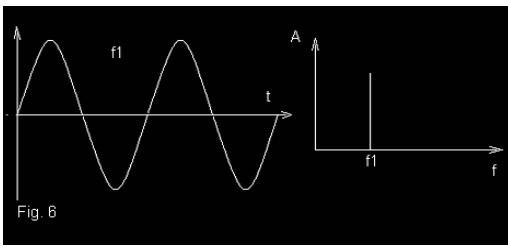
La experimentación física de los armónicos es el origen de las escalas occidentales y algunas orientales tal y como se conocen hoy en día. La serie armónica natural aparece también en los tubos sonoros así como en la voz humana por lo que nuestro oído está muy acostumbrado a tratar con todos estos armónicos e intervalos.

Las leyes de la armonía tradicional se basan también en la serie armónica y sus intervalos. La existencia de estos armónicos incide en la vivencia tímbrica, en las consonancias y disonancias que se puedan producir, etc. El timbre de un instrumento lo da en su mayor parte la distribución de estos parciales o armónicos.

### **Movimiento vibratorio amortiguado**

Una señal sinusoidal pura es una abstracción matemática que en la realidad difícilmente se va a dar ya que habría de continuar siempre con la misma amplitud y existir desde siempre. Podemos en cualquier caso generar eléctricamente esta señal sinusoidal mediante un generador de ondas.

El rozamiento con el aire y el rozamiento interno del sistema (la materia de la que se compone) hacen que la vibración tenga cada vez menos amplitud, el sonido se atenúa y al final desaparece. Esto ocurre, por ejemplo, al percutir una cuerda de piano o pulsar una de guitarra.

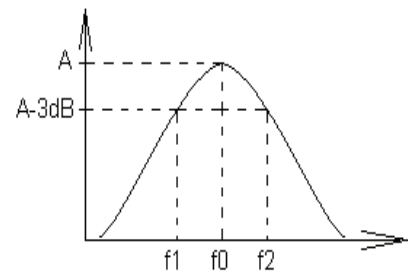


En la Fig.6 aparece una señal sinusoidal ideal representada en el tiempo con su correspondiente representación en el espacio de frecuencias. En un movimiento vibratorio amortiguado la sinusoide decae de forma exponencial y aunque no se mantiene del todo periódica se puede realizar el análisis de Fourier y podemos ver en la Fig.7 como es su gráfica en el espacio de frecuencias. Podemos ver una frecuencia central predominante y junto con ésta aparecen alrededor unas frecuencias de amplitud decreciente. La señal amortiguada es la suma de todas esas frecuencias: la central y todas las que aparecen a los lados.

Si el decaimiento de la señal es muy lento, pocas pérdidas por fricción, la gráfica de la representación en frecuencia tendrá un pico mas acusado, pocas frecuencias cerca, como en la Fig.7.

En un sistema que tiene muchas pérdidas de energía, tanto internas como por rozamientos con el aire, la amortiguación será grande y el decaimiento de la señal acústica se producirá en un intervalo de tiempo pequeño. La gráfica en el espacio de frecuencias presentará una figura con mayor **anchura de banda B**, tenemos una frecuencia central y una cantidad considerable de frecuencias a los lados de amplitud no mucho más pequeña. La altura de tono que percibimos no será en este caso muy definida.

La anchura de banda  $B=f_2-f_1$  es la diferencia entre las frecuencias que aparecen si bajamos 3 dB la amplitud máxima de la frecuencia central  $f_0$ . Una anchura de banda pequeña nos habla de un sistema con pocas pérdidas, un sonido que se mantiene bastante y una altura de tono bien definida. Si el sistema tiene una anchura de banda grande quiere decir que tiene muchas pérdidas de energía, se amortigua muy rápido. El sonido que produzca tendrá una altura de tono no tan definida. **Un sistema que tiene una anchura de banda amplia será capaz de responder a un rango mayor de frecuencias.** Las gráficas en el espacio de frecuencias podemos entenderlas así: nos dan una idea de **cómo** responde el sistema a las diferentes frecuencias. Representan la **admitancia** del sistema.



Podemos definir también el factor de calidad  $Q=f_0/B$ . Un sonido muy amortiguado que decae rápido, altura de tono poco definida, tendrá un factor de calidad bajo. Un sonido que se mantiene más tiempo, con amortiguación pequeña y con altura de tono definida tendrá un factor de calidad alto.

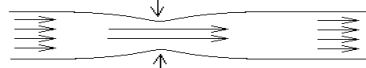
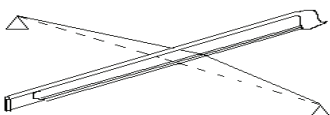
$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

Para una anchura de banda determinada el sistema de mayor frecuencia tendrá un factor de calidad mayor.

### Movimiento vibratorio forzado

Como hemos visto, las fricciones, el rozamiento con el aire y también la energía transmitida a la caja armónica amortiguan la cuerda y el sonido o la vibración se desvanece. Si queremos mantener constante la amplitud de este sonido tenemos que suministrar al sistema la misma cantidad de energía mecánica que la que pierde.

Existen dos mecanismos mediante los cuales transformamos la energía mecánica en energía acústica de forma constante y continua: El mecanismo de arco y el mecanismo de viento.



En el mecanismo de arco transformamos un movimiento continuo del arco en pequeños movimientos alternos. El arco, junto con la resina añadida a las cerdas,

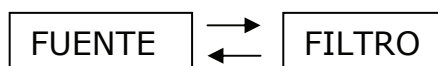
forma una superficie con un alto coeficiente de rozamiento que consigue arrastrar la cuerda. La tensión de la cuerda hace que en un momento dado ésta salte hacia su punto de equilibrio pero el arco en su movimiento ascendente vuelve a llevarse la cuerda por delante hasta el punto de máxima tensión y conseguimos así una pulsación periódica de la cuerda.

El mecanismo de viento se produce en un estrechamiento del tubo por donde circula el aire. El **teorema de Bernoulli** nos dice que un flujo de aire que está obligado a pasar por una zona más estrecha aumentará su velocidad de paso y creará una **depresión** en esa zona estrecha: se crea un vacío. En el paso estrecho la velocidad aumenta y disminuye la presión. La depresión que se genera hace que las paredes tiendan a cerrarse pero la elasticidad del material y el nuevo aire que llega empujan la membrana hacia su sitio. Se genera otra depresión y es así como un soplo continuo podemos transformarlo en una vibración. Este mecanismo se produce en algunos instrumentos musicales (en las cañas) como el clarinete, fagot, oboe, en los labios de un trompetista, en las cuerdas vocales, etc. Se produce en todos los instrumentos de lengüeta. En los instrumentos de bisel el mecanismo de generación de vibraciones es diferente. El teorema de Bernoulli también se aplica a las alas de un avión: la curvatura del ala es la que hace que se genere una depresión en la parte superior del ala y una fuerza ascendente. Los barcos de vela avanzan contra el viento gracias a este mismo fenómeno. Bernoulli dijo que se mantenía constante la suma de la presión y de la velocidad por lo que si uno de los valores aumenta el otro disminuye.  $P$  (presión),  $V$  (velocidad del aire),  $\rho$  (densidad del aire).

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{constante}$$

### Modelo físico del instrumento musical

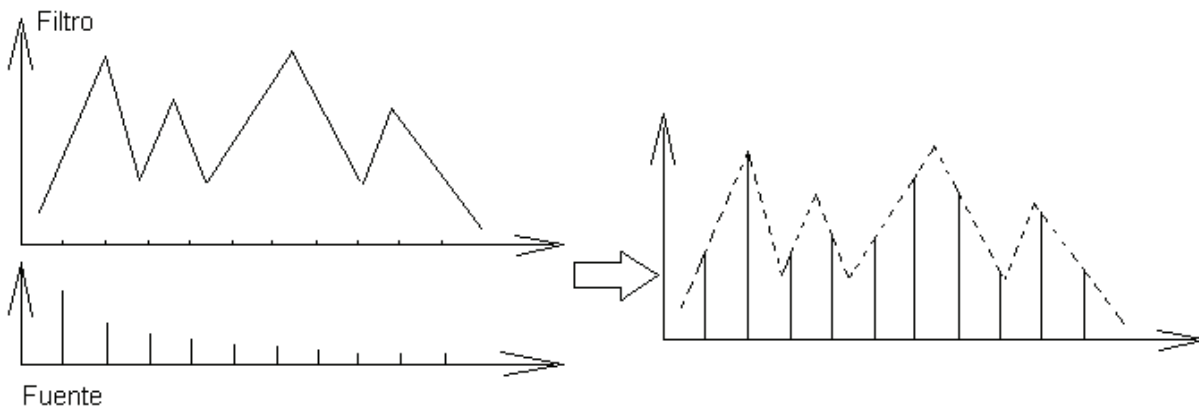
La simplificación más básica que hacemos de un instrumento musical es un sistema constituido por una fuente y un filtro.



En el caso nuestro la **fuerza** será todo aquello que genere una vibración con **una altura de tono definida** -como las cuerdas del piano- y el **filtro** será la parte del instrumento que se encarga de **amplificar** ese sonido generado -como la caja de un violín- la tapa armónica del piano, etc.

Una cuerda es un sistema que tiene muy pocas pérdidas por rozamientos por lo que será un sistema que produzca resonancias con un factor de calidad muy alto, resonancias muy picudas y armónicas, en consecuencia nos dará una altura de tono muy definida. Cuando escuchamos el sonido que produce una guitarra o un violín, no estamos escuchando el sonido producido por las cuerdas. Si colocamos en tensión una cuerda en una mesa de cemento y la pulsamos, la cuerda emitirá un sonido con una altura de tono definida pero no conseguiremos escuchar apenas nada a no ser que nos acerquemos mucho a ésta, la cuerda por si sola mueve muy poco aire y la presión acústica que genera es muy débil, necesitamos de otro sistema que amplifique esas vibraciones que produce. Esta función la hace la tapa armónica del piano o la caja de resonancia del violín. La fuente produce muchos armónicos con amplitud muy pequeña que pasan a través del puente al filtro, un sistema que tiene resonancias no tan picudas, a poder ser espaciadas, pero con amplitud o admitancia grande y capaz de generar suficiente presión sonora.

De todos los armónicos que produce la fuente y que pasan al filtro afortunadamente no todos ellos se amplifican, solo aquellas frecuencias a las que la caja de resonancia es capaz de responder. Lo que hace la caja de resonancia o tapa armónica de un instrumento es filtrar los armónicos que le llegan de la cuerda o fuente, amplificando unos y atenuando otros. El filtro es, en gran parte, lo que da el timbre característico a los instrumentos.



Los buenos instrumentos tienen cajas armónicas con resonancias limpias, altas y separadas para amplificar mucho un número reducido de armónicos de la fuente, lo que le confiere al sonido una claridad que no tendría si todos los armónicos que le llegan fueran amplificados. El exceso de armónicos amplificados hace que el timbre del instrumento sea más áspero.

La separación entre fuente y filtro a veces no es muy clara. En los instrumentos de viento-metal la fuente pueden ser los labios del intérprete y en los de viento-madera la lengüeta. Entre fuente y filtro existe una interacción. La vibración que generan los labios o la lengüeta no tiene una altura de tono definida, ésta se consigue con la longitud vibrante de la columna de aire por lo que este espacio hueco delimitado por la longitud del tubo también será parte de la fuente.

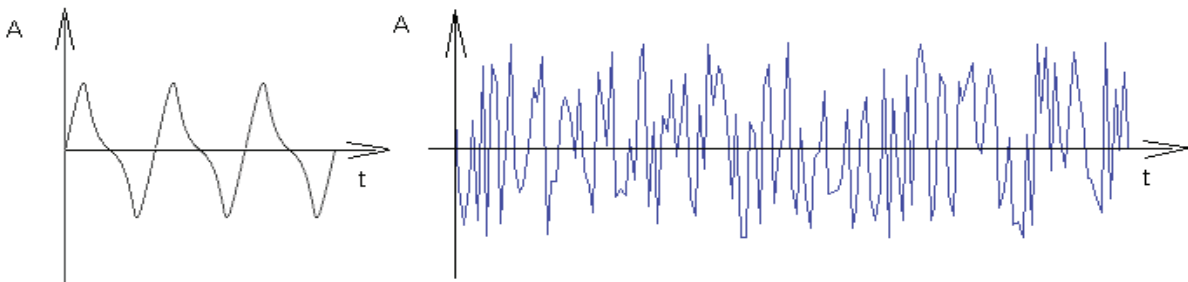
Los sistemas que funcionan como filtro tienen a ciertas frecuencias unas resonancias con mucha admitancia, y mucha superficie, lo que quiere decir que si llegan de la fuente esas frecuencias, con muy poca fuerza (la que llega de las cuerdas es suficiente) el sistema adquiere mucha velocidad, esto supone mucha amplitud de vibración que se traduce en presión sonora suficiente para la audición musical.

### 3. CONCEPTOS BÁSICOS UTILIZADOS EN ACÚSTICA

#### Sonido y ruido. Características físicas y perceptivas

Bajo el punto de vista vivencial un **sonido** es una señal acústica musical con una **altura de tono definida**. Un músico podría situar ese sonido en un pentagrama o en una escala. El **ruido** no podemos situarlo en una escala musical, es una señal acústica que **no tiene altura de tono definida**. Entre un ruido puro y un sonido puro tenemos señales intermedias que serán el lenguaje con el que se construye la música.

El **sonido** –altura de tono definida- esta ligado físicamente a la **periodicidad**. La señal que observamos en el tiempo tiene una estructura que se repite. Esta periodicidad que llega al tímpano es lo que hace que la altura de tono sea en nuestro cerebro definida. En un **ruido** no tenemos ningún tipo de periodicidad. Es una **señal aperiódica**.

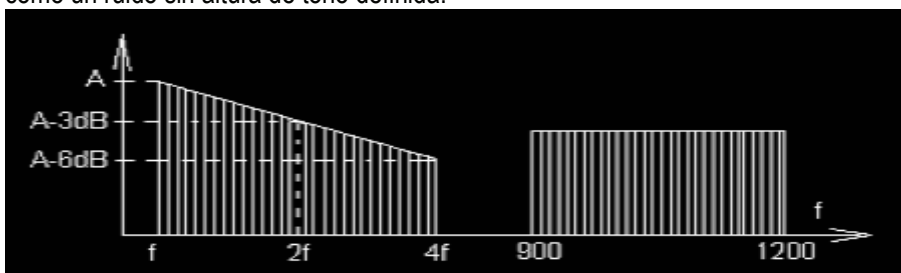


Desde el punto de vista físico el sonido y el ruido se diferencian en la cantidad de frecuencias que tienen uno y otro. Un sonido tiene una frecuencia fundamental y un número determinado de parciales que se ajustan a la serie armónica natural, lo que hace que musicalmente podamos situar un sonido en el pentagrama. La nota la obtenemos de la frecuencia fundamental y el resto de parciales refuerzan la sensación de altura de tono de esta nota. El ruido aparecería en las gráficas como un continuo de frecuencias.

Un sonido puro contiene una sola frecuencia. En el otro extremo tenemos el ruido puro blanco como una señal con todo el rango continuo de frecuencias, y todas con la misma amplitud.

El ser humano es capaz de percibir un rango de frecuencias entre 16 y 20000 Hz. Existen también infrasonidos y ultrasonidos que otros animales pueden percibir y que de alguna forma también nos afectan a nosotros aunque no tengamos percepción acústica de ellos.

Llamaremos ruido rosa a aquél cuya amplitud decae 3 dB por octava, de esta forma se consigue la misma energía en cada octava. También se utilizan en los estudios ruidos en una determinada banda de frecuencia: bandas de ruido blanco o rosa. Una explosión es una señal acústica aperiódica con una duración temporal muy corta –delta de Dirac- que se percibe como un ruido sin altura de tono definida.

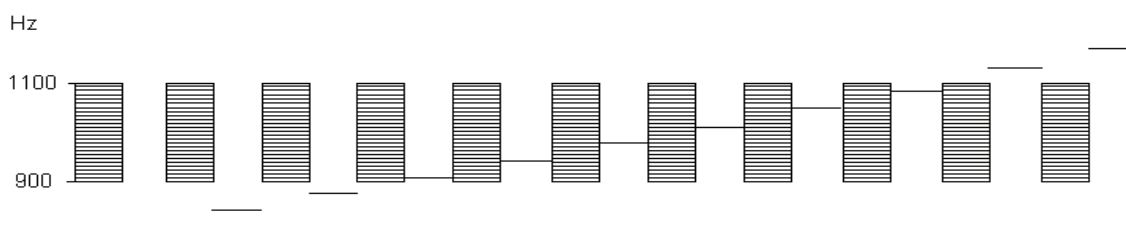


#### Efecto del ruido en la vivencia de continuidad de los tonos

En cualquier actividad musical el ruido existe. Los instrumentos emiten una componente de ruido, así como la sala o auditorio, las sillas, personas que tosen, latidos del corazón, respiraciones, etc.

Ciertos investigadores como Plomp se preocuparon por este tema y se plantearon si el ruido tenía o no alguna función en las audiciones musicales.

Si escuchamos una banda de ruido blanco entre 900 y 1100 hz. y simultáneamente un tono ascendente:



En el ejemplo sonoro se observaría como el tono ascendente lo vivenciamos continuo cuando entra en la banda de ruido. Físicamente no existe continuidad en el tono pero la parte auditiva del cerebro la genera: reconstruye el tono con la frecuencia contenida en el ruido que recibe.

En una sala el sonido llega al oyente de forma directa y también de forma reflejada. Los sonidos directos y los reflejados se escuchan a la vez. Toda esta mezcla de frecuencias al final se convierte en ruido. Este ruido ambiental o su ausencia (en una sala absorbente o seca) permitirán ejecutar obras de menor o mayor rapidez. El cerebro reconstruye las notas recibidas con el ruido ambiental y el tono se mantiene, lo que en algunos casos no será nada agradable.

La voz humana y los instrumentos en general pueden producir lo que se denomina vibrato, que es una modulación en frecuencia de la nota que se está ejecutando (aumenta y disminuye la frecuencia), con esto lo que hacemos es aumentar la banda de frecuencia, de este modo el timbre del instrumento es más rico en armónicos. El vibrato conlleva también una modulación en la amplitud por efecto del filtro.

Si hacemos el experimento anterior con los intervalos de ruido podemos ver que el cerebro es capaz de reconstruir la altura de tono y la sensación de vibrato. Lo mismo ocurre si la modulación es en la amplitud, el cerebro tiene capacidad de reconstruir con el ruido blanco que recibe toda la señal acústica con las características originales.

### Frecuencia y vivencia de la altura de tono

Lo que entendemos por **altura de tono** de una nota musical es un **concepto vivencial**. La altura de tono la asociamos a la **frecuencia** que es un **concepto físico**. La masa, la rigidez del sistema, las dimensiones geométricas, etc. hacen que el número de vibraciones por segundo que se generan sea mayor o menor. Se vio como la altura de tono estaba relacionada con el número de oscilaciones por segundo del sistema. La frecuencia es, de hecho, el número de oscilaciones o ciclos por unidad de tiempo –en nuestro caso un segundo– que realiza un sistema: a mayor frecuencia mayor altura de tono (agudo) y a menor frecuencia menor altura de tono (grave). Los sistemas que son capaces de vibrar con un número alto de oscilaciones por segundo (mucha rigidez o tensión, poca masa o longitud) nos dan sonidos **agudos**, una altura de tono alta. Un tono **grave** lo dará un sistema que se mueve a frecuencias bajas (poca rigidez o tensión, longitud o masa grande).

La unidad de medida de la frecuencia es el Hertz o **Hercio**: Hz. que será el número de oscilaciones o ciclos por segundo (cuerda, tubo, etc.).

La relación entre el concepto físico y el vivencial o musical no ha sido siempre la misma. A lo largo de los años ha ido variando de un país a otro. En la época barroca se consideró una afinación de 415 Hz para el LA<sub>4</sub>, después se estableció en 435 Hz. Hoy en día existe un diapason definido aunque no siempre se sigue este criterio:

Frecuencia	Vivencia
440 Hz.	LA <sub>4</sub>

Algunas orquestas afinan un poco por encima de esta cifra, 444 Hz (LA brillante) incluso se llega a veces hasta 450 Hz para conseguir más brillantez y sonoridad en perjuicio de los cantantes que no pueden con las alturas de tono que resultan en las notas más agudas.

### Sonoridad y amplitud de la presión sonora

La vivencia de un sonido se produce cuando a nuestros oídos llegan **variaciones de presión** respecto de la presión atmosférica que podemos considerar estable y que está provocada por el peso de toda la masa de aire que rodea al planeta. Estas variaciones de presión se producen cuando cualquier sistema susceptible de vibrar lo hace y mueve la



masa de aire que lo rodea. Una fuerza exterior ejercida sobre un sistema elástico lo desplaza de su punto de equilibrio y esta elasticidad hace que el sistema tienda a retornar a su posición de equilibrio; si el sistema no tiene muchas pérdidas de energía y no tiene excesiva amortiguación se producirán las vibraciones. La superficie de nuestro sistema empuja el aire circundante creando una sobrepresión y después una depresión, así se generan sucesivamente en el tiempo sobrepresiones y depresiones con la misma frecuencia a la que oscila el sistema. La masa de aire en promedio no cambia de posición pero empuja al que tiene alrededor, así las vibraciones que se producen en un instrumento se propagan a través del medio material que en nuestro caso es el aire y que también es elástico. Podemos imaginar unas piezas muy juntas, unidas al suelo mediante muelles: si empujamos la primera de ellas, ésta empujará a su vecina y retornará a su posición de equilibrio. De esta manera la vibración que se produce en la primera pieza se "copia" a través de todas ellas y llega hasta la última. El aire, al final del proceso, ejerce una fuerza oscilante sobre el tímpano y éste vibra con el mismo patrón que la original.

Cuanto mayor sea el desplazamiento de las vibraciones del sistema y mayor la superficie vibrante en contacto con el aire mayor será la presión ejercida sobre éste y mayor también la presión que ejerce el aire cercano sobre nuestro tímpano. Esto se traduce en mayor presión sonora o **sonoridad**.

Podemos decir entonces que la vivencia de la sonoridad está ligada a la amplitud de estas variaciones de la presión y que éstas dependen de la amplitud de vibración y de la superficie del sistema.

En términos físicos la presión es la fuerza ejercida por unidad de superficie. En el sistema MKS (metro, kilogramo, segundo) la fuerza la medimos en Newtons: **Nw** y la presión la medimos en Pascales: **Pa**, luego un Pascal es una fuerza de un Newton aplicada sobre un metro cuadrado.

Fuerza = masa x aceleración (gravedad) = 1Kg x 9.8 m/s<sup>2</sup> = 10 Nw (más o menos) ésta es la fuerza que tenemos que hacer para sostener una masa de un kilogramo. Un Pascal será la presión que ejerce una fuerza de 0.1 Kg (100 gramos) sobre 1 m<sup>2</sup>.

Las presiones sonoras mínimas que pueden empezar a impresionar el oído humano -el sistema auditivo completo con la consecuente vivencia- son del orden de 0.00002 Pa. que es la presión que ejercen dos milésimas de gramo sobre un metro cuadrado (2x10<sup>-7</sup> gr/cm<sup>2</sup>). Una presión sobre el tímpano tan pequeña es capaz de generar una vivencia acústica en el cerebro. La mayor de las presiones que es capaz de soportar el oído humano es 1.000.000 veces mayor o más, del orden de 20 Pa. incluso 200 Pa. a frecuencias muy bajas.

Estas cifras tan extrañas de manejar se pueden transformar mediante la función logarítmica. Por definición log<sub>x</sub> b es el número al que hemos de elevar la base x del logaritmo para que nos de el número b del cual queremos calcular el logaritmo (en este caso utilizamos logaritmos en base 10). Nuestro oído trabaja de manera parecida a como lo hace la función logarítmica:

$$\begin{array}{ll} \text{Log}_{10} 1=0 & \text{ya que } 10^0=1 \\ \text{Log}_{10} 10=1 & \text{ya que } 10^1=10 \\ \text{Log}_{10} 100=2 & \text{" } 10^2=100 \\ \text{Log}_{10} 1000=3 & \text{" } 10^3=1000 \end{array}$$

La definición del belio es la siguiente: es el logaritmo del cociente entre la intensidad a medir I y una intensidad de referencia I<sub>0</sub>: bel=log(I/I<sub>0</sub>), decibel=10log(I/I<sub>0</sub>)=10log(P/P<sub>0</sub>)<sup>2</sup> ya que I=P<sup>2</sup>

Definimos el **Nivel de Presión Sonora** como:

$$NPS(dB) = 20 \log \frac{P}{P_0}$$

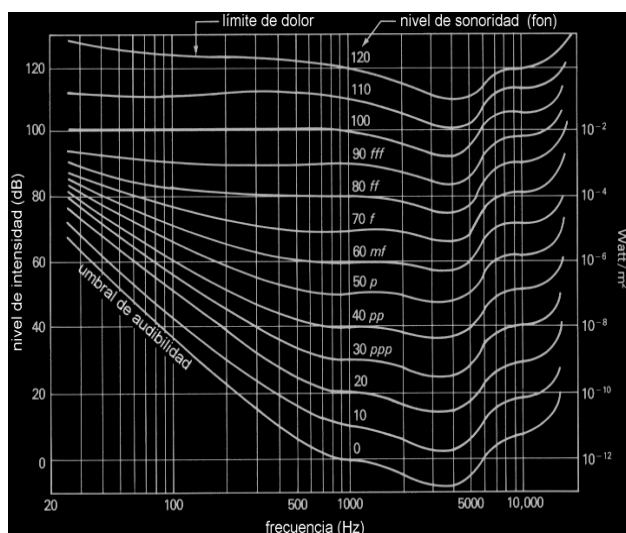
Hemos establecido nuestra referencia P<sub>0</sub>=0.00002 Pa como la mínima señal audible a 1000 Hz. De esta manera mediante logaritmos transformamos unas cifras complejas en otras más manejables.

Presión sonora :	P (Pa)	dB
Umbral de audición	0.00002	0
Susurro de hojas	0.000063	10
Conversación muy baja	0.0002	20
Conversación en voz baja	0.00063	30
Habitación de vivienda	0.002	40
Conversación normal	0.0063	50
Conversación animada	0.02	60
Trafico de calle	0.063	70
Trafico pesado	0.2	80
Compresor	0.63	90
Taller de chapeado	2	100
Avión despegando	6.3	110
Umbral de dolor	20	120
Máxima presión	200	140

Se sabe que los peores golpes para el oído son los instantáneos y además de alta frecuencia como martillazos sobre metal que, aún no siendo muy fuertes, a largo plazo pueden dañar muy seriamente el oído. Los músicos de las orquestas están sometidos a picos de presión sonora de 140 y 150 dB y no acaban con daños apreciables ni roturas. Tal vez la respuesta sea que al oído del músico llegan pocas frecuencias, sonidos y armonías y no ruidos con un espectro muy amplio de frecuencias. No es lo mismo estar sometido a un ruido blanco de 120 dB que a una orquesta limpia de 120 dB.

### Percepción de la presión sonora: FON

Vamos a ver como varia la sensación de sonoridad con la frecuencia. No es lo mismo escuchar un sonido de 2000 hz y 50 dB que otro de 80 hz y 50 dB, la vivencia que tendremos de la sonoridad será diferente en los dos casos aunque la presión sonora sea la misma. Uno nos parecerá mucho más sonoro que el otro, el grave apenas lo percibiremos. El estímulo físico que nos llega es el mismo en los dos casos, la presión sonora sobre el tímpano es la misma pero nuestro oído es más sensible a frecuencias altas que a bajas y los 50 dB a 2000 Hz nos parecerán mucho más sonoros que los 50 dB a 80 Hz. El oído humano tiene su máximo de sensibilidad entre 3000 y 4000 Hz.



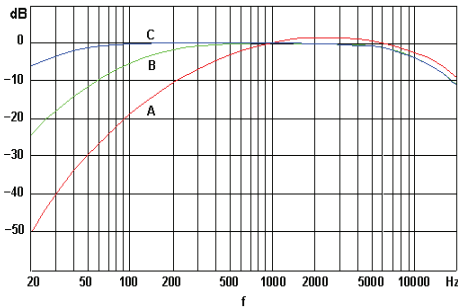
Los estudios se han realizado con tonos puros y mediante estadísticas se llegó a la siguiente tabla donde aparecen las líneas que nos dan la misma sensación de sonoridad, son las que llamamos **líneas isófonas** que mediremos en FONES. La más baja de las líneas en el gráfico expresa el verdadero umbral de audición para las diferentes frecuencias. A 1000 Hz. El umbral es 0 dB pero según disminuye la frecuencia hay que aumentar el nivel de presión sonora para llegar a percibir el sonido. A frecuencias cercanas a los 3000-4000 Hz. el umbral de audición es incluso menor de 0 dB, esto quiere decir que escuchamos sonidos de menos de 0.00002 Pa. En 1000 Hz. coinciden dBs y FONES. A 30 Hz. debemos aumentar hasta algo más de 60 dB la presión sonora para percibir sonido alguno. La curva de 50 FON, p.e. nos dice que tanto a 100 hz como a 3000 hz esos decibelios que marca la tabla nos darán la misma sensación de sonoridad.

Podemos ver como el umbral de dolor a 3000 hz puede ser de 110 dB mientras que a 20 Hz podemos soportar hasta 150 y 160 dB. A esa misma frecuencia de 20 Hz y a 60 dB nuestro oído y cerebro no serán capaces de percibir sensación sonora alguna.

El tamaño del oído influye en la sensibilidad que presenta éste a ciertas frecuencias. El nuestro es un sistema relativamente pequeño que responde mejor a frecuencias altas. Las curvas isófonas tienen su importancia desde el punto de vista musical. En los aparatos de música eléctricos de hace años no se tenía en cuenta este fenómeno y el descenso de volumen se hacía por igual en dB en todas las frecuencias, esto supone que a volúmenes muy bajos las frecuencias 1000-5000 hz son las únicas que el oído percibe y el sonido que se escuchaba era el característico y metálico de las

radios antiguas. A volumen alto las líneas isófonas son casi paralelas por lo que no se produce tanta diferencia de percepción entre bajas y altas frecuencias. El "loudness" en los amplificadores a volumen bajo compensa en bajas frecuencias este fenómeno.

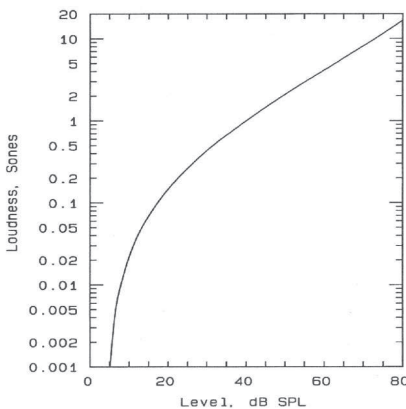
Podemos ver también que las curvas isófonas están más juntas en las frecuencias graves y más separadas en las agudas por lo que hará falta una mayor variación en dB a altas frecuencias que a bajas para percibir cambios en la sonoridad.



Los instrumentos de alguna manera compensan estos fenómenos y al tocar más fuerte los armónicos superiores crecen más que el fundamental grave por lo que el timbre del instrumento no varía mucho. En los aparatos de medida tenemos tres tipos de decibelios: A, B y C. Los dBA descuentan lo que el oído humano deja de oír y no consideran aquellas presiones sonoras que no percibimos aunque estén presentes en el ambiente. Los dBC nos medirán todas las presiones sonoras reales que hay en el ambiente, que son las que percibe el oído a volumen alto. Las diferentes curvas de ponderación se utilizan cuando queremos medir presiones a bajo volumen (dBA), volumen medio (dBB) y volumen alto (dBC).

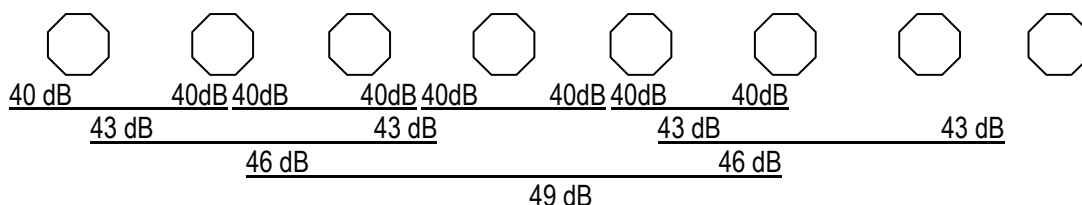
**Fuerza sonora. SON**

No sabemos nada sobre cuántas veces es más fuerte un sonido comparado con otro. Se pueden hacer pruebas aumentando la sonoridad de diferentes tonos puros y preguntando a la gente, de esta manera obtenemos un grafico que representa cuántas veces es más fuerte un sonido que otro. Podemos ver como el doble de fones no suponen el doble de sonoridad. Tenemos que tener en cuenta también que un incremento de 10 a 20 dB es diferente a uno de 90 a 100 dB. A volúmenes altos un cambio de 10 dB supone mucho más cambio de sonoridad que los 10 dB a muy bajo volumen sonoro.



Un SON es por definición, a 1 kHz, un sonido de 40 FONES. El doble de fuerte será un sonido de 2 SONES lo que suponen unos 49 FONES. Aumentar en unos 9 o 10 FONES supone doblar en fuerza el sonido. Cada cambio de matiz en el lenguaje musical suele suponer doblar la sonoridad: ppp, pp, p, mp, mf, f, ff, fff. Los SONES los podremos sumar pero para que esto sea posible los sonidos que se suman han de estar separados en frecuencia al menos un intervalo mayor que la anchura crítica de banda ACB que veremos en próximos capítulos.

Los instrumentos de una orquesta que tocan una misma melodía producen las mismas frecuencias. Si esto se produce, al sumar la sonoridad de dos violines primeros no tendremos el doble de sonoridad, tan solo conseguimos 3 dB más de sonido. Si ponemos otra fuente igual, otros dos violines, y tocan los cuatro, tendremos otros 3 dB más y si queremos conseguir los 9 dB necesarios para doblar la sonoridad de un solo violín tendremos que añadir otra fuente igual, otros cuatro violines más. Para obtener el doble de sonoridad con instrumentos que estén tocando la misma melodía tendremos que pasar de uno a ocho instrumentos.



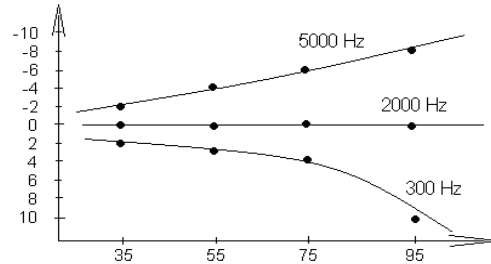
## 4. PROPIEDADES PSICOACÚSTICAS

### Altura de tono e intensidad sonora

Nuestro sistema auditivo, como hemos visto ya, tiene para cada frecuencia una capacidad de respuesta diferente. Vimos como por su tamaño y características fisiológicas responde mejor a frecuencias comprendidas entre los 2000 y 5000 Hz.

Trabajaremos con un tono puro y veremos lo que pasa si incrementamos la sonoridad de esa señal: percibiremos una variación de la altura de tono y sin embargo mediciones físicas nos dicen que la frecuencia de la señal no ha variado. La tabla y el grafico nos muestran que ocurre para las diferentes frecuencias:

dB	300 hz	2000 hz	5000 hz.
35	2%	0%	-2%
55	2.5%	0%	-4%
75	4%	0%	-6%
95	10%	0%	-8%



Si aumentamos en 35 dB la presión sonora de un tono puro de baja frecuencia nos parecerá que la altura de tono disminuye y tendríamos que subir la frecuencia cerca de un 2% para percibir la misma sensación de altura de tono que al principio. Según aumentamos el volumen sonoro la sensación se acentúa y percibimos una altura de tono aun más baja aunque el sistema físico siga emitiendo la misma frecuencia. Con los sonidos agudos pasa lo contrario: si aumentamos en 35 dB la sonoridad lo percibimos más agudo y tendríamos que bajar un 2% la frecuencia de la señal para que la altura de tono nos pareciera la misma que al principio. Los tonos puros graves muy fuertes nos parece que suenan más graves de lo que son y los tonos puros agudos muy fuertes nos parece que suenan más agudos de lo que son.

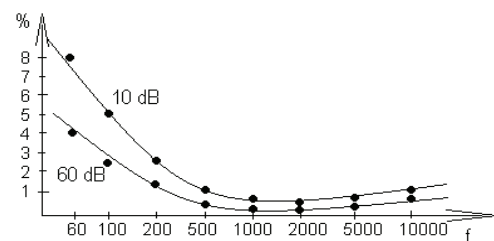
En un instrumento musical junto al fundamental aparecen muchos armónicos de alta frecuencia que compensan el efecto y no lo sentiremos tan acusado como aparece en las gráficas.

### Umbral de discernibilidad para la altura de tono

Este umbral lo definimos como la mínima variación en frecuencia necesaria en un sonido para percibir cambio alguno en la altura de tono. Si variamos 0.00001 hz es probable que no notemos cambio pero una variación de 0.1 hz puede que si, dependiendo de la frecuencia del sonido puro en cuestión. Nuestro oído es más sensible a las frecuencias cercanas a 3000 hz. y menos sensible a las bajas frecuencias y a frecuencias muy altas. Pequeñas variaciones en 3000 hz. las notaremos, sin embargo para apreciar cambio alguno en la altura de tono a bajas frecuencias necesitaremos una variación mayor de la frecuencia.

Vamos a ver en que momento somos capaces de percibir un cambio en la altura de tono. Esto nos puede servir para saber cuanto habremos de afinar para que el público no lo note. Cuando el tono es bajo necesitamos variar más la frecuencia para percibir una variación en la altura de tono.

f (Hz)	60 dB	10 dB	f (Hz)	60 dB	10 dB
60	4%	8%	1000	0.3%	0.6%
100	2.5%	5%	2000	0.2%	0.4%
200	1.3%	2.6%	5000	0.3%	0.5%
500	0.5%	1%	10000	0.5%	0.6%



Un sonido puro de 60 hz. y 10 dB necesita de una variación en la frecuencia de un 8% (más de medio tono) para que seamos capaces de apreciar un cambio en la altura de tono. Este mismo sonido de 60 hz. si lo escuchamos más fuerte (60 dB) la variación necesaria será menor, tan solo con 4% notaremos cambio, aun así vamos a ver como esta variación del 4% (tercio de tono) es demasiado grande. El oído es menos sensible cuando los sonidos que le llegan tienen poca sonoridad. En realidad sí que somos capaces de apreciar los cambios de medio tono en las notas graves de un piano. Lo que sucede es que este efecto solamente ocurre cuando escuchamos tonos puros y en la realidad de los instrumentos musicales esto nunca ocurre. La nota  $SI_1$  de un piano tiene un fundamental de 61.735 hz. pero nos va a llegar

acompañada de toda su serie armónica de frecuencias más altas y son estos armónicos los que nos van a ayudar a percibir los cambios de medio tono que se producen.

A medida que aumenta la frecuencia el oído percibe mejor los cambios y en este caso la máxima sensibilidad se produce alrededor de los 2000 hz. donde a nada que varíe un 0.2% la frecuencia lo notaremos. Las pequeñas variaciones se notan: un vibrato, una mala afinación, etc., esto hace que los instrumentos que tengan estas frecuencias en su tesitura sean muy expresivos y requieran de más precisión.

En la práctica musical real se observa que una variación de un 0.4% es un umbral válido. A partir de este valor se perciben cambios. Por debajo de este umbral no se aprecia cambio alguno en la afinación. Un 0.4% es un tercio de la coma sintónica. En la música informatizada, frecuenciómetros digitales, programas de sonido para ordenadores y demás instrumentos musicales electrónicos los saltos que se hacen en frecuencia son de 0.4% en 0.4%. Menos de esto no merece la pena ya que no notamos cambio y saltos mayores crearían discontinuidades perceptibles en la altura de tono.

### Condiciones de duración para una señal acústica y la vivencia de la altura de tono

Tenemos una señal sinusoidal pura y vamos a ver cuál es el tiempo mínimo que ha de durar esta señal para que podamos percibir bien la altura de tono. Si la señal que nos llega es un pulso muy corto nuestro cerebro no será capaz de reconocer su altura de tono. La experimentación nos dice que el tiempo mínimo que ha de durar una señal es de 25 ms. Cuanto más dure la señal mejor percibiremos su altura de tono.

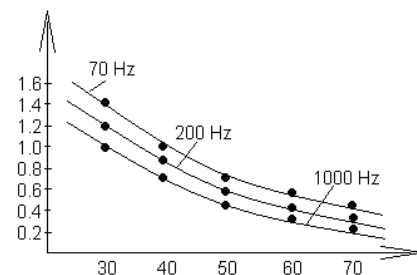
250 ms (cuarto de segundo) son más que suficientes. En el metrónomo de Metzel ( $t=60$  s) una negra vale un segundo, la corchea medio, la semicorchea vale ya un cuarto de segundo (250 ms), la fusa un octavo de segundo y la semifusa un dieciseisavo de segundo, que son 62.5 ms. La altura de tono de estas notas que se dan en algunos pasajes no será fácil de reconocer.

Un sonido largo y uno corto (inferior a 1/10 de segundo) de la misma sonoridad no se perciben igual de sonoros. A partir de este tiempo se perciben con la misma sonoridad.

### Umbral de discernibilidad para el nivel sonoro

Podemos definirlo como el mínimo cambio necesario en la presión sonora para percibir variación alguna en la vivencia de la sonoridad.

	70hz	200hz	1000hz
30dB	1.4	1.2	1.0
40dB	1.0	0.87	0.7
50dB	0.75	0.65	0.50
60dB	0.60	0.50	0.40
70dB	0.55	0.45	0.35



Un sonido de 30 dB y 70 hz de frecuencia necesita una variación en la presión sonora de 1.4 dB para que podamos notar cambio alguno. Para este mismo sonido pero a 70 dB con que subamos 0.55 dB ya percibimos un cambio en la sonoridad.

Cuanto mayor sea la altura de tono menor variación necesitamos para enterarnos de que ha habido cambio alguno, ya que el oído es más sensible a estas frecuencias altas. A volúmenes sonoros altos las variaciones necesarias son también menores. En los programas de ordenador y aparatos electrónicos dedicados a la música se hacen saltos en la presión sonora de 0.25 dB y a nosotros nos parecerá que el aumento de volumen es continuo. Este dato es un poco menor que la mínima de las variaciones que somos capaces de detectar (0.35 dB).

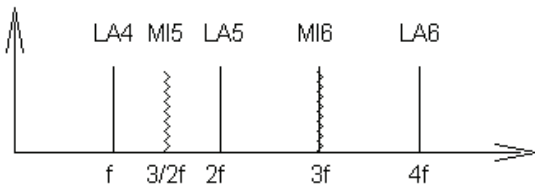
### Pulsaciones o batidos y sonidos diferenciales

Si escuchamos simultáneamente dos sonidos muy próximos en frecuencia percibiremos batidos o pulsaciones. Estos batidos son una modulación en la amplitud de la presión sonora y se escucharán tantos batidos por segundo como diferencia de hercios exista entre los dos sonidos.

400 hz y 402 hz nos darán 2 batidos por segundo

400 hz y 420 hz nos darán 20 batidos por segundo

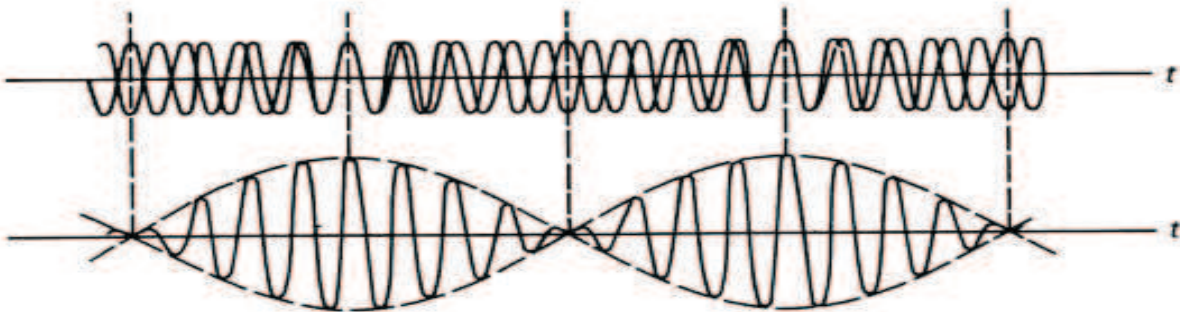
En este segundo caso el número de batidos es tan alto que la sensación que nos llega es de un sonido áspero y disonante. La disonancia está muy ligada a la formación de batidos.



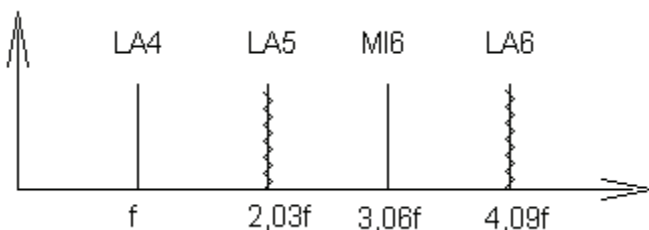
Si queremos afinar un violín lo hacemos tocando simultáneamente dos cuerdas, por ejemplo el LA<sub>4</sub> y el MI<sub>5</sub>. Al tocar dobles cuerdas separadas por un intervalo de una 5ª vemos como el tercer armónico del LA<sub>4</sub> coincide con el segundo armónico del MI<sub>5</sub> y lo que buscaremos es que estos armónicos tengan exactamente la misma frecuencia. Moviendo la clavija de afinado variamos la frecuencia del MI<sub>5</sub> hasta que escuchamos un sonido claro y limpio, desaparecen los batidos y es entonces cuando coincide la frecuencia y la proporción entre el LA<sub>4</sub> y el MI<sub>5</sub> es de 3/2, un intervalo de 5ª justa. La misma operación se realiza con las demás cuerdas del violín, que afinamos respecto de la referencia inicial del LA<sub>4</sub> más oportuna: 440 hz, 442 hz, etc.

$$\begin{aligned} \text{sen}A + \text{sen}B &= 2 \times \text{sen}[(A+B)/2] \times \text{cos}[(A-B)/2] & A &= 2\pi f_1 t & B &= 2\pi f_2 t \\ \text{sen}(2\pi 400t) + \text{sen}(2\pi 402t) &= 2 \times \text{sen}(2\pi 401t) \times \text{cos}(2\pi 1t) \end{aligned}$$

lo que percibimos en este caso de dos sonidos de 400 y 402 hz es un sonido compuesto donde la altura de tono la da la parte senoidal con 401 hz (intermedio) y aparece modulada en amplitud por la parte cosenoidal de frecuencia 1Hz. Esto supone un periodo de la modulación de  $T = 1$  segundo lo que nos da los dos batidos por segundo.



En un piano las cuerdas no son exactamente armónicas, presentan una pequeña inarmonicidad, lo que hace que el segundo "armónico", en este caso parcial, de cada nota sea un poco mayor del doble del fundamental y los superiores también son mayores. A la hora de afinar las octavas haremos coincidir el segundo armónico de la primera nota con el fundamental de la segunda nota 8ª por lo que cuando las frecuencias de los armónicos sean exactamente iguales la segunda nota será un poco mayor que la octava matemáticamente exacta de 2f. La afinación de un piano es un compromiso entre un numero de batidos que no moleste mucho y una sensación de octava normal. Las cuerdas de los pianos de pared son las que más problemas de inarmonicidad presentan. Los pianos de gran cola tienen precisamente semejantes dimensiones para montar cuerdas más largas y finas en las que estos problemas de inarmonicidades son menos acusados.



La afinación de un piano es un compromiso entre un numero de batidos que no moleste mucho y una sensación de octava normal. Las cuerdas de los pianos de pared son las que más problemas de inarmonicidad presentan. Los pianos de gran cola tienen precisamente semejantes dimensiones para montar cuerdas más largas y finas en las que estos problemas de inarmonicidades son menos acusados.

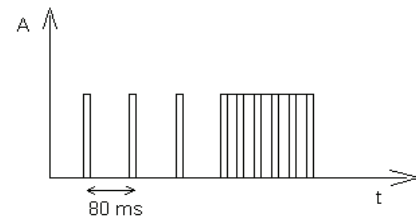
Si la diferencia de hercios aumenta entre los sonidos que escuchamos simultáneamente, no tendremos un numero de batidos concreto. Con determinados intervalos de frecuencias aparecerán los sonidos diferenciales (descubiertos por un violinista llamado Tartini y un organista, Sarge), sonidos psíquicos o tonos de combinación. En este caso percibiremos un "sonido" de frecuencia  $f$  que resulta ser la diferencia entre los dos sonidos  $f_1$  y  $f_2$ ,  $f=(f_2-f_1)$ . Este fenómeno será más evidente cuando las dos frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  pertenezcan a la serie armónica que resulta del sonido diferencial  $f$ . Dos sonidos de frecuencias  $3f$  y  $2f$  nos dan un sonido diferencial de frecuencia  $f$ .

Este fenómeno de los sonidos diferenciales se utilizó en su día en la construcción de órganos. El sonido más grave que podemos escuchar tiene una frecuencia de unos 16 hz. y lo dará un tubo de longitud aproximada de 10 m. Si no se dispone de sitio, o material, podemos generar, con tubos más cortos, toda la serie armónica menos la fundamental, si 10 m de tubo dan 16 hz. un tubo de 5 m nos dará un sonido de 32 hz y toda su serie armónica (64 hz, 96 hz, 128 hz, etc.) y mediante diferentes tubos podemos generar la serie armónica que corresponde a la frecuencia fundamental de 16 hz y aunque no esté físicamente presente esta nota (superposición de ondas) el cerebro la reconstruye. Tendremos la sensación de escuchar este sonido grave pero lo percibiremos como un ronroneo bastante pobre en sonoridad.

### Constante de tiempo del oído

En este apartado veremos cuánto tiempo necesita el oído para relajarse y percibir separadas dos señales acústicas que le llegan consecutivas. Si golpeamos algún material muchas veces por segundo es posible que oigamos todo como un sonido casi continuo.

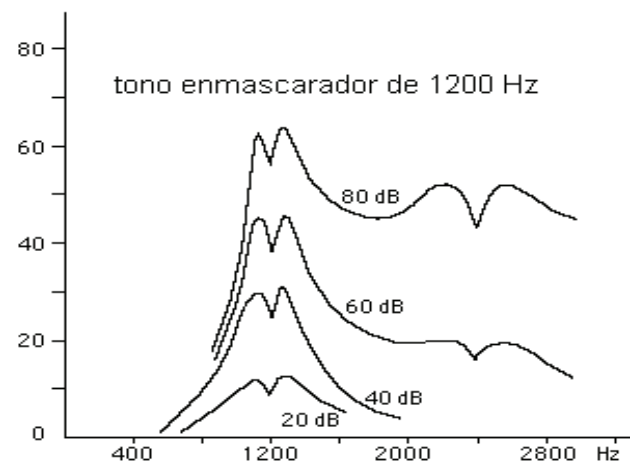
El intervalo, en el tiempo, en el cual comienza a no ser posible discriminar señales o pulsos consecutivos será esta constante de tiempo de la que hablamos. Se sitúa entre 50 y 100 ms lo que supone entre 20 y 10 golpes por segundo. Podemos considerar un tiempo estándar de 80 ms. Este tiempo será el necesario para que el sistema auditivo se relaje después de oír una señal y percibamos la siguiente señal como diferente. Esta constante tiene mucha importancia a la hora de diseñar salas acústicas. Los sonidos que generan los instrumentos nos llegan directamente pero también nos llegarán los sonidos reflejados en las diferentes paredes y superficies planas de la sala. Estos sonidos reflejados que llegan a nuestros oídos lo hacen en un tiempo que dependerá de las dimensiones de la sala y será muy conveniente que el tiempo este no supere los 80 ms. Si un sonido llega p.e. al de 25 ms no oiremos esa segunda señal diferenciada pero reforzará a la primera lo que creará el efecto de la reverberación. Lo que llegue en los primeros 10 ms queda enmascarado y no refuerza al primer sonido. Si los sonidos reflejados llegan a nuestros oídos después de 80 ms empezaremos a percibir lo que llamamos eco.



### Enmascaramiento. Consideraciones de interés musical

Definimos el enmascaramiento como la anulación de un sonido por la mayor intensidad sonora de otro. Este fenómeno puede ser crítico en orquestas y bandas donde el equilibrio entre instrumentos que tienen muy diferentes sonoridades es crucial. Asistir a un concierto en el cual alguno de los instrumentos integrantes queda enmascarado solo es bueno en el único y desafortunado caso en el que el instrumentista enmascarado toque mal.

Vamos a suponer un tono enmascarador de 1200 Hz que está a 20, 40, 60 y 80 dB por encima de su umbral de audición. La gráfica nos muestra las curvas de puntos del sonido enmascarado. Nos dicen cuántos dB tenemos que elevar este tono enmascarado por encima de su umbral de audición para que podamos percibirlo. A 20 dB vemos como únicamente los tonos de frecuencia parecida quedan un poco enmascarados. Nos basta con elevar a 15 dB el tono enmascarado para percibirlo. Las frecuencias tanto altas como bajas se oirán con cualquier intensidad sonora.



Si aumentamos la sonoridad del tono enmascarador la cosa cambia. A 60 dB se empiezan a enmascarar un poco las altas frecuencias. Si subimos a 80 dB el tono enmascarador, se puede observar como los tonos de frecuencia alta quedan muy enmascarados mientras que los graves apenas se enmascaran. Podemos resumir el fenómeno con las siguientes palabras:

- El efecto es máximo para sonidos con frecuencias próximas a las del sonido enmascarador.
- El efecto es mínimo para sonidos de baja frecuencia.
- Con intensidad sonora elevada se enmascaran mucho más las frecuencias altas y muchas más frecuencias que con un nivel de presión sonora baja del sonido enmascarador.

## 5. LAS ESCALAS MUSICALES EN LA TEORIA Y EN LA REALIDAD

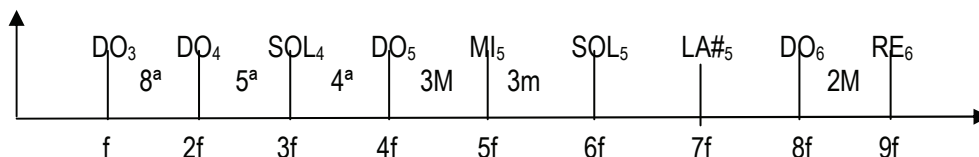
### Introducción

Hemos definido un sonido como una señal acústica con altura de tono definida que podemos situar en una escala musical. Cuando hablamos de escalas musicales nos referimos a una serie de sonidos distribuidos en el intervalo de octava. Existe una periodicidad en la vivencia de la altura de tono de este intervalo y que físicamente se refiere a dos sonidos que tienen frecuencias con una relación de 2 a 1, esto es, una de las frecuencias es el doble de la otra. Lo que vamos a hacer es dividir esta octava en diferentes partes o intervalos más pequeños y lo que ocurra en una octava lo podremos trasladar a las demás.

Existen diferentes maneras, en occidente, de dividir esta octava, diferentes sistemas que no tienen grandes diferencias entre si aunque suficientes como para que el oído humano las pueda apreciar. En la realidad musical intervienen las características de los instrumentos, costumbres culturales, aspectos de tipo psicológico, etc. Todos los sistemas de escalas se basan en la vivencia de los armónicos y en las relaciones de frecuencia que existen entre algunos de ellos.

Los principios de las escalas se remontan muchos siglos atrás y se desarrollaron en civilizaciones como la china, la armenia, etc. Los primeros estudios de los que tenemos conocimiento los hicieron Pitágoras y su grupo. Estos apasionados por las ciencias, tanto físicas como espirituales, analizaron cuerdas en tensión y estudiaron cómo pulsando y rozando la cuerda en puntos que la dividen en partes iguales, 2, 3, 4, etc. aparecían lo que hoy conocemos como armónicos. Relacionaron vivencias de altura de tono agradables con relaciones sencillas de la cuerda.

Si tomamos los intervalos que forman los armónicos entre si e intentamos dividir la octava nos encontramos con algunos problemas:



Para trabajar con las frecuencias tenemos que tener en cuenta un principio básico: Cada intervalo musical tiene asociado un número que viene dado por la relación que existe entre las frecuencias correspondientes a las notas que forman el intervalo. Si tenemos en cuenta la serie armónica natural de arriba podemos ver p.e. que el intervalo entre el 2º y 3º armónico es una 5ª justa, de DO a SOL, y el número asociado a la quinta será la división entre las frecuencias de las dos notas, mayor entre menor,  $3f/2f=3/2$ . Procedemos igual para el resto de intervalos: 3m: MI-SOL,  $SOL/MI=6f/5f=6/5$ , etc. Tenemos que tener en cuenta también que una suma musical de intervalos corresponde a una multiplicación de los números asociados y una resta de intervalos la realizaremos mediante una división de estos.

Partimos de la serie armónica y nos encontramos con que no podemos dividir nuestra octava en partes iguales que coincidan con los intervalos que aparecen en esta serie. Tres 3M, aunque musicalmente compongan una octava, no llegan a la octava y cuatro 3m se pasan. Seis 2M también se pasan de la  $8^a=2/1$ , y los demás intervalos:  $5^a=3/2$ ,  $4^a=4/3$ ,  $3M=5/4$ ,  $3m=6/5$ ,  $2M=9/8$ ,

$$3M+3M+3M=8^a (?)$$

$$5/4 \times 5/4 \times 5/4 = 125/64 < 2$$

$$3m+3m+3m+3m=8^a (?)$$

$$6/5 \times 6/5 \times 6/5 \times 6/5 = 1296/625 > 2$$

$$2M+2M+2M+2M+2M+2M=8^a (?)$$

$$9/8 \times 9/8 \times 9/8 \times 9/8 \times 9/8 \times 9/8 = 531441/262144 > 2$$

### El diapasón

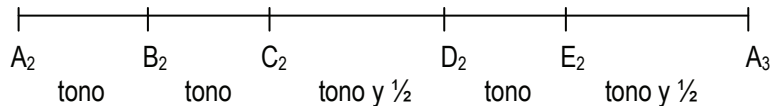
Partimos, por convenio, del LA<sub>4</sub> para afinar los instrumentos musicales en las orquestas, en los conservatorios, en casa, etc. Tenemos que definir una frecuencia para este LA<sub>4</sub> (LA<sub>3</sub> en algunos países). En un principio, en la época barroca se decidió por unanimidad entre músicos, compositores y constructores definir el LA<sub>4</sub> como la altura de tono que da un sonido de 415 Hz pero enseguida empezaron a subir esta altura de tono para obtener de cada instrumento más brillo y sonoridad. Hoy en día después de pasar por los 435 Hz finalmente se considera aceptado el LA<sub>4</sub>=440 Hz.



En las orquestas se valora la brillantez por lo que se ha llegado a afinar hasta a 450 y 460 hz lo cual era inaceptable para los cantantes que tenían que forzar muchísimo la voz. Es muy común en estos días afinar en 442 Hz y a veces hasta en lo que se denomina el LA brillante de 444 Hz. Los instrumentos barrocos que se conservan hoy en día, por sus características se siguen afinando en 415 Hz.

### Sistema pentatónico

La cultura china, anterior a la griega, investigó y descubrió modos o escalas basadas en el intervalo de 5ª justa, de relación 3/2 como lo hiciera Pitágoras posteriormente. Mediante cuatro saltos de este intervalo consiguieron dividir la octava y crear una escala de cinco tonos.



### Sistema generativo de Pitágoras

Pitágoras y su grupo de estudiosos vieron, como también lo hicieran otros estudiosos de otras culturas, que una misma longitud de cuerda tensa produce sonidos diversos sin más que dividir la cuerda en partes iguales y pulsar la cuerda rozando con un dedo en esos puntos que dividen la cuerda en partes iguales y que se llaman nodos. Estos sonidos tocados a la vez se vivencian muy armoniosos, sobre todo aquel que surgía al dividir la cuerda en tres partes, lo que hoy conocemos como el tercer armónico, y el que se escucha al dividir la cuerda por la mitad, segundo armónico. Este grupo de apasionados por las matemáticas comprendió que los sonidos consecutivos que aparecían en la cuerda (armónicos) mantenían entre si relaciones matemáticas sencillas. Definieron matemáticamente el intervalo musical y pusieron el máximo empeño en los dos intervalos de relaciones 3/2 y 4/3, los que hoy conocemos como 5ª justa y 4ª justa. A partir de estas relaciones surge la escala de Pitágoras. Se definió el tono pitagórico como la diferencia que existe entre la 5ª y la 4ª ( $3/2 \div 4/3 = 9/8$ ) y el semitono pitagórico como el intervalo que queda al restarle dos tonos a la 4ª ( $4/3 \div 9/8 = 32/27 \div 9/8 = 256/243$ ). La escala de Pitágoras también surge si hacemos seis saltos de intervalo de 5ª de razón 3/2:

FA DO SOL RE LA MI SI

Partimos de una frecuencia de referencia para el DO que llamamos  $f$ , entonces la frecuencia del SOL será  $3/2xf$ , que para nosotros es una 5ª. La frecuencia del RE, una quinta del SOL, es  $3/2 \times 3/2xf = 9/4xf$  pero ésta es una frecuencia que está una octava por encima de la nota que necesitamos nosotros: el RE que sigue al DO. Lo que haremos es bajar la frecuencia de este RE una octava dividiendo entre 2,  $9/4xf \times 1/2 = 9/8xf$ . Para obtener el MI hacemos cuatro saltos de 5ª:  $(3/2)^4xf = 81/16xf$  pero esta frecuencia queda dos octavas por encima de la nota que buscamos por lo que dividimos dos veces por 2:  $81/16x(1/2)x(1/2)xf = 81/64xf$ . La frecuencia del FA la obtenemos mediante un salto descendente de 5ª hacia atrás desde el DO por lo que tendremos que dividir  $f$  entre 3/2, nos queda  $2/3xf$  pero una octava por debajo de su tono. Tenemos para el FA  $2/3x(2/1)xf = 4/3xf$  y así sucesivamente para todas las notas.

La escala que obtenemos es la tonalidad de DO Mayor pitagórica cuya estructura: t, t, st, t, t, t, st, se repetirá en todos los demás sistemas y es el que se ha establecido, probablemente heredado del modo griego o tetracordo pitagórico.

	$9/8$	$9/8$	$256/243$	$9/8$	$9/8$	$9/8$	$256/243$	
DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO	
$f$	$9/8f$	$81/64f$	$4/3f$	$3/2f$	$27/16f$	$243/128f$	$2f$	
	tono	tono	semitono	tono	tono	tono	semitono	

Tenemos una escala con cinco tonos y dos semitonos diatónicos MI-FA y SI-DO. Si a un tono le quitamos este semitono diatónico obtenemos el semitono cromático que nos dará todas las alteraciones DO#, RE♭, etc. El intervalo que existe entre dos notas consecutivas lo calculamos dividiendo sus frecuencias, de RE a MI tenemos  $MI/RE = (81/64f)/(9/8f) = 9/8$ , de MI a FA tenemos  $FA/MI = (4/3f)/(81/64f) = 256/243$ , etc. Podemos ver como un tono pitagórico es un intervalo que tiene asociado el numero  $9/8 = 1.125$ , lo que supone un aumento en frecuencia del 12.5%.

Tono Pitagórico	$9/8 = 1.125$	12.5%
Semitono diatónico	$256/243 = 1.0534979$	5.35%
Semitono cromático	$(9/8) \div (256/243) = 2187/2048 = 1.067871$	6.79%

Vamos a ver como queda la afinación en el sistema pitagórico. La única nota que no cambia nunca y que está fijada por convenio es el  $LA_4=440$  Hz. A partir de ésta y mediante las relaciones que existen entre las diferentes notas obtenemos las frecuencias correspondientes a las demás notas.

Como  $LA_4=DO_4 \times (27/16)$  entonces tenemos que:

$$DO_4=LA_4 \times (16/27)=440 \times (16/27), DO_4=260.74 \text{ Hz}$$

A partir de esta frecuencia del DO podemos calcular todas las demás notas:

$$RE_4=DO_4 \times (9/8)=260.74 \times (9/8)=293.33 \text{ Hz.}$$

$$MI_4=DO_4 \times (81/64)=260.74 \times (81/64)=330 \text{ Hz también podemos calcularlo como: } MI=RE \times (9/8)$$

$$\text{La frecuencia del } FA_4=DO_4 \times (4/3)=260.74 \times (4/3)=347.65 \text{ Hz.}$$

La frecuencia del  $SOL_4=DO_4 \times 3/2$  y al ser un tono descendiente del LA también es:

$$SOL=LA \times 8/9=440 \times 8/9=391.11 \text{ Hz.}$$

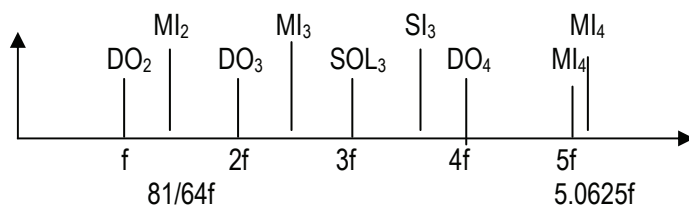
$$SI_4=DO_4 \times (243/128) \text{ o también } SI_4=LA_4 \times (9/8)=495 \text{ Hz.}$$

El  $DO_5$  es una octava del  $DO_4$  por lo que será  $DO_5=DO_4 \times 2=260.74 \times 2=521.48$  Hz.

Si queremos calcular las frecuencias de las otras octavas solo tenemos que multiplicar sucesivamente por 2 ó dividir entre 2 las diferentes frecuencias de las notas correspondientes:  $LA_5=880$  Hz,  $LA_3=220$  Hz,  $LA_2=110$  Hz,  $LA_1=55$  Hz,  $LA_0=27.5$  Hz.

	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI
4ª octava	260.74	293.33	330.0	347.65	391.11	440.0	495.0
2ª ovtava	65.18	73.33	82.5	86.91	97.78	110.0	123.75

Esta afinación va muy bien si lo que queremos interpretar es una melodía de tonos consecutivos, suena muy agradable al oído, pero en el momento en que interpretamos algún tipo de armonía, si tocamos acordes, aparecen algunos problemas. En el acorde de 3ª M como vemos en el gráfico: la frecuencia del  $MI_2$  respecto de la del  $DO_2$  es de  $81/64=1.265625$  esto hace que el cuarto armónico del  $MI_2$ , que será el  $MI_4=(81/64f) \times 4=5.0625f=330$  Hz, no coincida con el quinto armónico del  $DO_2$  que habrá de ser también el  $MI_4=5f=325.9$  Hz. En este caso se escuchan algo más de cuatro batidos o pulsaciones.



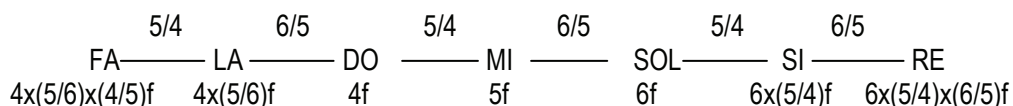
Esta pequeña diferencia entre los armónicos de una y otra nota es suficiente como para apreciar un número de batidos y vivenciar este acorde como desafinado mas aun si se interpreta en un instrumento de mecanismo mantenido como puede ser un órgano.

Los músicos y científicos de la época se empeñaron en corregir este problema y surgieron así otros sistemas y escalas temperadas que corregían parte de los problemas, pero aparecían otros...

### Sistema de Aristógenes-Zarlino

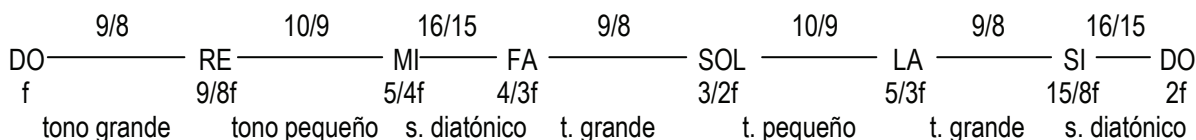
Aristógenes fue el precursor de este sistema que perfeccionó posteriormente Zarlino. En su día Aristógenes tomó como base el intervalo que aparece entre los armónicos cuarto y quinto y que hoy en día conocemos como una 3ª Mayor. Los armónicos cuarto, quinto y sexto forman un acorde mayor con una 5ª justa pero aparece también la 3ª M y si el sistema se basa en estos armónicos es de suponer que los problemas de afinación que daba el sistema de Pitágoras desaparecerán. El coeficiente asociado a la 3ª M es  $5/4$  y el que corresponde a la 3ª menor es  $6/5$  como se puede ver en la serie armónica natural.

Para generar todos los tonos que tendrá nuestra escala o tonalidad mayor tomamos tres acordes mayores, uno central DO-MI-SOL y a partir de éste tomamos otro acorde mayor por encima: SOL-SI-RE y otro más por debajo del central: FA-LA-DO. Tenemos terceras mayores, menores y quintas que guardan las proporciones que conocemos.



Para obtener la frecuencia de las diferentes notas partimos del acorde mayor compuesto por los armónicos cuarto, quinto y sexto de la serie armónica natural, 4f, 5f y 6f. La frecuencia del SI la obtenemos multiplicando la frecuencia del SOL, 6f, por el número asociado con la 3ª M: 5/4 y nos queda SI=(5/4)x6f. Las demás notas las obtenemos de forma similar, por ejemplo LA=(5/6)x4f ya que el LA es una 3ª menor descendente a partir del DO. Después de simplificar los coeficientes tenemos que trasladar cada frecuencia a nuestra octava. Dividiremos entre dos para bajar una octava tantas veces como sean necesarias hasta obtener coeficientes para las notas comprendidos entre 1 y 2.

La relación que guardan las siete notas es:



En este sistema aparecen tonos grandes y pequeños que complican un poco el asunto de la afinación. Los acordes mayores en este sistema están muy conseguidos y perfectamente afinados pero surgen otros problemas. La 5ª entre DO y SOL es perfecta pero si tomamos la quinta RE-LA el coeficiente que obtenemos es menor, LA/RE=(5/3)f/(9/8)f=40/27=1.481481, menor que una quinta justa, este acorde sonará desafinado.

En este sistema aparece un criterio para los semitonos diferente al pitagórico. En el pitagórico el semitono diatónico es menor que el cromático mientras que en este sistema, perfeccionado posteriormente por Delezenne, tenemos un semitono diatónico bastante grande y los semitonos cromáticos que aparecen son menores que el diatónico.

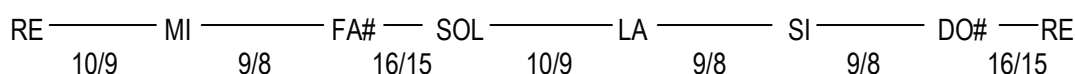
Semitono diatónico:	16/15=1.066666=6.67%
Semitono cromático grande:	(9/8)/(16/15)=1.054685=5.47%
Semitono cromático pequeño:	(10/9)/(16/15)=1.041666=4.17%
Tono grande:	9/8=1.125=12.5%
Tono pequeño:	10/9=1.111=11.1%

La versión inicial de Zarlino consideraba un solo semitono cromático como la diferencia entre una 3ª Mayor y una 3ª menor (5/4)/(6/5)=25/24=1.04166666=4.17% y a partir de aquí obtenía dos semitonos diatónicos, uno grande (9/8)/(25/24)=1.08=8% y otro pequeño (10/9)/(25/24)=1.0666=6.67%. La versión de Delezenne es más equilibrada ya que los tres semitonos que aparecen son más parecidos que los inicialmente considerados del 4%, 6% y 8% de Zarlino.

La diferencia que hay entre el tono grande y el tono pequeño se denomina Coma sintónica y podemos calcularla dividiendo el tono mayor entre el menor (9/8)/(10/9)=81/80=1.0125=1.25%. Como ya sabemos el oído humano es capaz de discernir variaciones en frecuencia del 0.4% por lo que esta coma sintónica será una cantidad a tener en cuenta.

	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI
4ª octava	264	297	330	352	396	440	495
2ª octava	66	74.25	82.5	88	99	110	123.75

En el sistema pitagórico todos los tonos son iguales mientras que en este sistema de Aristógenes-Zarlino aparecen dos tonos diferentes que hacen que una vez afinado el instrumento musical las obras han de componerse para esa tonalidad en la que se afina y si quisiéramos trasponer las melodías toda la afinación se trastocaría y lo que antes eran acordes perfectos con sus relaciones armónicas se transformarán ahora en acordes desafinados. Por ejemplo la tonalidad de RE Mayor:



Lo que en la tonalidad de DO Mayor es un acorde mayor DO-MI-SOL en esta tonalidad se convierte en RE-FA#-LA y como hemos visto antes esta quinta no sonará muy armónica. La diferencia entre las dos quintas (3/2)/(40/27)=81/80 es otra vez la coma sintónica. El segundo armónico del LA es 2x(40/27)f=80/27f=2.96296f un poco mas pequeño que el tercer armónico del RE que es 3f con lo cual aparecerán batidos entre estos dos armónicos.

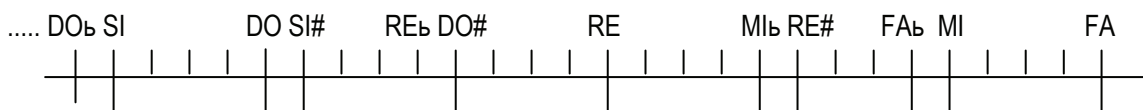
### La escala según el sistema de Holder

Este teórico musical inglés (1614-1697) ideó una estructura tomando como base la afinación pitagórica. Analizando el sistema de Pitágoras asignó a cada tono 9 comas, al semitono diatónico le asignó 4 comas y cinco al semitono cromático. La octava consta de cinco tonos y dos semitonos diatónicos por lo que nos salen  $9 \times 5 + 4 \times 2 = 53$  comas de Holder. Podemos entonces dividir la octava en 53 partes y tendremos una afinación casi igual a la de Pitágoras, pero esta vez sin tener en cuenta ningún criterio basado en los armónicos.

Para obtener el valor de la coma de Holder, que será una de esas 53 partes, hacemos lo siguiente, dividimos el intervalo de octava,  $f-2f$  en 53 intervalos pequeños, si llamamos  $h$  al intervalo representado por esta coma nos queda:

$$\begin{aligned} & \text{53 veces} \\ f \times h \times h \times \dots \times h &= 2f ; f \times h^{53} = 2f \text{ simplificando } h^{53} = 2 ; h = \sqrt[53]{2} \\ & h = 1.013164 = 1.32\% \end{aligned}$$

Este será el número por el que tenemos que multiplicar cada frecuencia para subir una coma de Holder y obtener así toda la escala.



Las afinaciones de las diferentes notas en este sistema quedan casi exactas a las de Pitágoras:

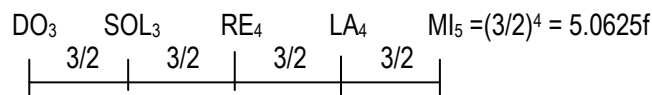
	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI
4ª octava	260.77	293.34	329.99	347.71	391.14	440	494.96

### Temperamento mesotónico de 1/4 de coma

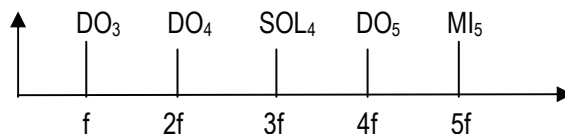
Los temperamentos mesotónicos se caracterizan por la disminución de todas las 5ª en una cierta cantidad, igual para todas. Dependiendo de la cantidad acortada unos acordes quedarán más parecidos a los justos que otros. Hemos visto como en Pitágoras la 5ª justa es de  $3/2$  pero este método nos da unas 3ª Mayores que no son muy buenas. Si hacemos 12 saltos de 5ª justa nos aparecen todas las notas con sus alteraciones pero nos encontramos con una frecuencia  $(3/2)^{12} f = 129.746f$  y podemos ver como en estos 12 saltos de 5ª hemos subido siete octavas por lo que la frecuencia a la que hemos de llegar ha de ser  $128f$ . La diferencia entre ellas es la coma pitagórica.

MI<sub>b1</sub> -SI<sub>b1</sub> -FA<sub>2</sub> -DO<sub>3</sub> -SOL<sub>3</sub> -RE<sub>4</sub> -LA<sub>4</sub> -MI<sub>5</sub> -SI<sub>5</sub> -FA#<sub>6</sub> -DO#<sub>7</sub> -SOL#<sub>7</sub> -RE#<sub>8</sub> Este último RE#<sub>8</sub> debería ser igual al MI<sub>b8</sub>.

Vamos a considerar ahora los saltos de DO a MI:



Los armónicos del DO<sub>3</sub> son:



La nota fundamental MI<sub>5</sub> que aparece después de cuatro saltos de 5ª es 5.0625 veces la frecuencia del DO<sub>3</sub> y por otra parte tenemos que el quinto armónico del DO<sub>3</sub> también es un MI<sub>5</sub> pero con una frecuencia que es 5 veces la del DO<sub>3</sub>. Esta pequeña diferencia es suficiente como para que el acorde DO-MI suene desafinado. Una forma de solucionar esto es hacer saltos de 5ª un poco más pequeños de manera que en cuatro de estos saltos llegáramos al MI<sub>5</sub> =  $5 \times DO_3$ .

Dividimos el intervalo de  $f$  a  $5f$  en cuatro partes:

$$\begin{aligned} f \times S \times S \times S \times S &= 5f ; S^4 \times f = 5f ; S^4 = 5 ; S = \sqrt[4]{5} \\ & S = 1.495349 \end{aligned}$$

Podemos obtener la misma cantidad para la quinta mesotónica de  $\frac{1}{4}$  de coma, calculando cuanto vale la diferencia entre los dos  $M_5$  que aparecen:

$$(3/2)^4 f / 5f = 81/80, \text{ la coma sintónica}$$

Es esta cantidad la que dividiremos en cuatro partes,  $\frac{1}{4}$  de coma, y este cuarto de coma es lo que tenemos que "restar" a la 5ª de Pitágoras para obtener la 5ª mesotónica de la que hablamos.

$$^4\sqrt{81/80} = 1.00311 \quad 0.311\%$$

$$(3/2) / 1.00311 = 1.495349$$

Resuelto ya el problema de las 3ª M aparece otro al final del camino. Si hacemos ahora 12 saltos con esta 5ª más pequeña nos vamos a una frecuencia de 125f, esto supone que el último salto que ha de hacerse para que las frecuencias de los RE<sub>b</sub> correspondientes sean la misma ha de ser muy grande. En 11 saltos de 5ª llegamos a  $(1.495349)^{11} f = 83.59 f$  y en otro salto mas hemos de llegar a 128 f. La diferencia que existe entre estas dos frecuencias es una quinta demasiado grande:

$$128 f / 83.59 f = 1.53128$$

Esto nos va a generar una serie de acordes muy extraños en los que el sonido se rompe y que se conoce como la quinta del lobo. Este temperamento se atribuye a Zarlino. Existen otros, de  $\frac{1}{3}$  de coma atribuido a Salinas que favorece las 3ª menores y otros temperamentos como el de  $\frac{2}{7}$  de coma intermedios entre estos dos.

### Temperamento de Silbermann, mesotónico de $\frac{1}{6}$ de coma

La chapuza involuntaria y no deseada que suponía el temperamento de  $\frac{1}{4}$  de coma hizo que algunos teóricos de la afinación como Silbermann o Werckmeister optasen por otras soluciones. Si se hacen saltos de quinta no tan pequeños como los de  $\frac{1}{4}$  sino un poquito mayores para que el ultimo de los saltos no sea tan grande el problema de los acordes del lobo puede solucionarse. Una buena opción podría ser acortar las quintas  $\frac{1}{6}$  de la coma sintónica, así, se sacrifican un poco las 3ª M perfectas pero se evita la quinta del lobo famosa que desagradaba a los organistas. El apaño era casi imperceptible y de todos los sistemas de afinación se puede considerar que es el más musical y el más equilibrado de todos. Algunos teóricos y organistas creían que el de  $\frac{1}{5}$  de coma era aun más musical.

$^6\sqrt{81/80}$  es la cantidad que quitaremos a la 5ª justa para obtener la 5ª:

$$(3/2) / (^6\sqrt{81/80}) = 1.496897583, \quad (1.496897)^{11} = 84.54987$$

El último salto de 5ª no queda tan grande:  $128/84.54987 = 1.5138999$ , aparecen algunos batidos pero no tantos como en el temperamento de Salinas. La quinta templada de Bach que obtenemos es un 0.21% mas pequeña que la de Pitágoras, es menor del 0.4% discernible por lo que la diferencia apenas se notara a la hora de afinar y los acordes darán batidos que casi no los apreciaremos.

El intervalo de 3ª M aparece con cuatro saltos de 5ª templada ascendentes y dos octavas descendentes, la frecuencia que obtenemos así respecto de la 3ª M armónica es un 0.4% mayor, aceptable para que el acorde suene bien.

$$(1.496897583)^4 / 4 = 1.255186782 ; \quad 1.2552 / 1.25 = 1.004149, \quad 0.41\%$$

De los 24 acordes principales que tenemos, doce mayores y doce menores, para el temperamento de  $\frac{1}{6}$  de coma 16 acordes son muy buenos, 6 dudosos y 2 malos. Resulta ser el sistema más equilibrado. El temperamento de Pitágoras con sus saltos de 5ª perfecta nos da 6 acordes muy buenos 16 dudosos y 2 malos. En los temperamentos de Aristógenes-Zarlino o de Ramos Pareja, casi idénticos, de todos los acordes 6 son perfectos, 16 normales y 2 muy malos.

### Sistema equitemperado o temperamento igual

Se cree que fue Francisco Salinas (1577), organista y teórico, uno de los precursores de este temperamento. En los anteriores sistemas se hacen distinciones entre un RE<sub>b</sub> y un DO#. En realidad no son la misma nota y este hecho acarrea problemas a los constructores de instrumentos de tecla, claves y órganos, pero sobre todo a los constructores de instrumentos de cuerda con trastes. Estos problemas se solucionaron mediante un compromiso equilibrado.

Se han construido a lo largo de la historia teclados con todas las notas, una tecla para el RE<sub>b</sub> y otra para el DO#, pero esto suponía un gran esfuerzo de aprendizaje y de construcción que se resolvió con los sistemas de afinación equitemperados. En este temperamento lo que se hace es distribuir entre las quintas la coma pitagórica  $(3/2)^{12}/128$ .

Dividimos la octava en doce intervalos, doce semitonos exactamente iguales. Necesitamos para esto un número tal que multiplicado doce veces nos dé el intervalo de octava: 2.

$$f \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S \times S = 2f \quad ; \quad S^{12} f = 2f \quad ; \quad S^{12} = 2$$

$$S = \sqrt[12]{2} \quad S = 1.059463 = 5.946\%$$

Las frecuencias para las diferentes notas y alteraciones las calculamos multiplicando el LA<sub>4</sub> por el número asociado a este semitono equitemperado 1.059463:

$$\begin{aligned} LA\#_4 = SI\flat_4 &= 440 \times 1.059463 = 466.16 \text{ Hz}, & SI_4 &= 466.16 \times 1.059463 = 493.88 \text{ Hz} \\ DO_5 &= 493.88 \times 1.059463 = 523.25 \text{ Hz}, & DO_4 &= 523.25 / 2 = 261.62 \text{ Hz} \\ DO\#_4 &= 261.62 \times 1.059463 = 277.18 \text{ Hz}, & RE_4 &= 277.18 \times 1.059463 = 293.66 \text{ Hz} \\ & \text{etc.} \end{aligned}$$

DO=f, MI=S<sup>4</sup>f=1.2599f, esto es una 3ª M que no concuerda con la que aparece en la serie armónica natural por lo que en un instrumento así afinado tendremos acordes que darán batidos y sonará algo desafinado aunque sea el temperamento más parecido al pitagórico y proporciona buenas melodías. Ocurre lo mismo con la quinta, SOL = S<sup>7</sup> x f = 1.4983f, no coincide con  $(3/2)f=1.5f$  pero se le parece mucho.

DO	DO#	RE	RE#	MI	FA	FA#	SOL	SOL#	LA	LA#	SI	DO
	RE <sub>b</sub>		MI <sub>b</sub>			SOL <sub>b</sub>		LAB		SI <sub>b</sub>		

### Temperamentos desiguales

Existen otro tipo de temperamentos en los que la cantidad que se disminuye a cada quinta es diferente. Se trata de distribuir la coma pitagórica de forma irregular entre las quintas. Una posibilidad es dejar las 5ª cromáticas justas y disminuir las 5ª diatónicas. Tienen importancia, entre otros muchos los temperamentos de Werckmeister. En el más conocido de ¼ de coma, se distribuye la coma pitagórica entre cuatro 5ª: Do-Sol, Sol-Re, Re-La y Si-Fa#.

### Causas y exigencias para la construcción de escalas. Ventajas e inconvenientes

Si suenan varias notas a la vez, un acorde, lo que exigimos es que no se aprecie un excesivo número de batidos. Si tocamos simultáneamente ambos sonidos escucharemos la serie armónica natural de los dos a la vez. Lo que más apreciamos es que exista una máxima coincidencia entre estos armónicos.

El sistema de Aristógenes-Zarlino nos da acordes limpios, más o menos casi todos, así como el temperamento de Silbermann también da buenos acordes.

El sistema de Pitágoras no da buenos acordes pero ofrece unas melodías que los músicos prefieren, los intervalos son más musicales, escuchados melódicamente, además este sistema tiene la ventaja de no quedar alterado frente a la trasposición de la obra de una tonalidad a otra, en cambio en el sistema de Aristógenes-Zarlino una trasposición no sonará igual al contener tonos de diferente tamaño. Esto, algunos compositores puristas lo prefieren y les parece bien. Los temperamentos mesotónicos ofrecen la posibilidad de tener tonalidades con expresividades diferentes, lo que no ocurre con el temperamento igual en el que todas las tonalidades son expresivamente iguales con lo que se pierde la posibilidad de componer para cada tonalidad buscando emociones y expresividades concretas.

Las escalas están ligadas en todas las culturas a la existencia de la serie armónica de cada sonido que genera cada instrumento y como no, a nuestra voz que es capaz de generar también una serie armónica para cada fundamental que emitimos. Si hiciéramos música con sonidos puros, sin armónicos, el sentido de escala musical cambiaría, ya que no entrarían en el juego los armónicos superiores que son los que nos pueden dar batidos, consonancias, disonancias o desafinaciones. El concepto de octava también desaparecería y tendríamos libertad absoluta para dividir cualquier intervalo en tantas partes como quisiéramos.

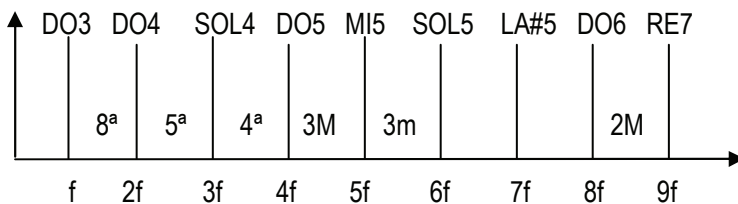
En una encuesta hecha a músicos sobre las preferencias de los diferentes intervalos se vio cuales son los que más gustan por termino medio:

	Preferida	Aristógenes-Zarlino	Pitágoras	Equitemperada
2ª M	1.1218	1.1111	1.125	1.1225
3ª M	1.2614	1.25	1.2656	1.2599
5ª	1.5018	1.5 1.4815	1.5	1.4983
8ª	2.0046	2.00	2.00	2.00

El piano es un instrumento complejo de afinar ya que para cada nota tenemos no una sino varias cuerdas que suenan a la vez y además existe la problemática de la inarmonicidad de las cuerdas: octavas dilatadas. La sensación que nos dan las notas de un piano es que están un poco más altas de lo que nos podría dar un analizador por el hecho de ser los armónicos superiores un poco más altos de lo normal. Un piano puede estar afinado con un  $LA_4 = 438.3$  Hz. y nos puede dar la sensación de escucharlo igual que un diapason puro de 440 Hz. El piano está afinado un poco por debajo para compensar esta inarmonicidad de las cuerdas. Si nos acostumbramos a tocar el piano nos acostumbraremos también a las octavas dilatadas.

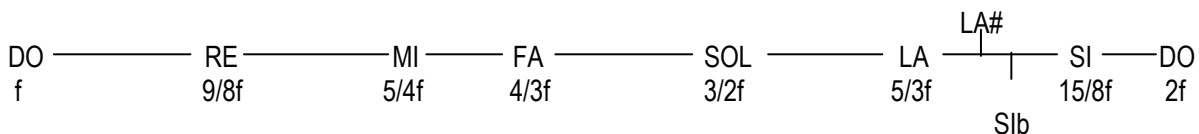
Ciertas escalas del temperamento de  $1/6$  de coma mesotónico están muy cerca de las pitagóricas. Interpretar una melodía con la escala de Pitágoras es muy natural. La afinación, en los instrumentos de entonación libre, dependerá de cada intérprete, de su gusto, su personalidad, etc. El estado de ánimo influirá también en la afinación: en días de alegría o euforia se tiende a afinar un poco por encima de lo normal y en momentos depresivos se afina a la baja. Los intervalos dilatados en el piano le dan más emotividad a la obra. Las melodías quedan mejor con una afinación expresiva que dilate un poco los intervalos como la 3ª M pitagórica que es un poco mayor que la justa de Zarlino.

Al etiquetar la serie armónica natural encontrábamos dificultades con el séptimo armónico. El intervalo entre el sexto y el séptimo armónico es algo menor que una 3ª m pero sin llegar a ser una 2ª M y se tiene que encontrar la nota musical que más se acerca a la frecuencia real de este armónico séptimo 7f:



$$Sib_5 \text{ (aristogénico)} = DO_3 \times (5/3) \times (16/15) \times 2 \times 2 = 7.111111f,$$

$$LA\#_5 \text{ (aristogénico)} = DO_3 \times (15/16) \times (15/16) \times 2 \times 2 = 7.03125f$$



Esta última nota, LA# aristogénico, se acerca más a la frecuencia real del armónico.

### Posibles desarrollos en las escalas

Busoni (1866-1924), al igual que muchos otros más en diferentes tradiciones musicales, desarrolló escalas y construyó instrumentos con tercios de tono. En este sistema la octava se divide en seis tonos y cada tono en tres partes por lo que nos queda la "octava" dividida en 18 partes. Este músico compuso obras para este tipo de afinación.

$$t^{18} \times f = 2 \times f; \quad t = \sqrt[18]{2}; \quad t = 1.03926 \quad 3.9\%$$

Alois Haba (1897-1973) no se conformaba con esto y fue un poco más lejos al componer música con cuartos de tono. Este tipo de música es frecuente en la cultura hindú, búlgara, y probablemente otras. Este músico dividió la "octava" también en seis tonos pero ahora cada tono en cuatro partes por lo que nos quedan en total 24 partes para una "octava".

$$t^{24} \times f = 2 \times f; \quad t = \sqrt[24]{2}; \quad t = 1.0293 \quad 2.93\%$$

### Concepto de Cent

El Cent aparece con la música electrónica y los aparatos de afinación. Es una buena medida para comparar las frecuencias de los diferentes temperamentos y afinaciones. En muchos casos las diferencias son tan pequeñas que es necesaria una unidad de medida como la del Cent. Se asigna a cada semitono equitemperado 100 cents, así la octava consta de 1200 partes o cents y el valor para cada uno de estos cents lo podemos calcular como hemos hecho hasta ahora:

$$c^{1200} \times f = 2 \times f ; \quad \text{CENT} = \sqrt[1200]{2} = 1.00057779 \quad 0.05\%$$

Una 5ª equitemperada con siete semitonos tiene 700 cents. Un tono equitemperado 200 cents, etc. Un intervalo cualquiera I tiene un número n de cents que calculamos de la siguiente manera:

$$I = c^n ; \quad c = \sqrt[1200]{2} ; \quad I = (\sqrt[1200]{2})^n$$

tomamos logaritmos en ambas partes de la igualdad:

$$\log I = \log(\sqrt[1200]{2})^n ; \quad \log I = n \times \log(\sqrt[1200]{2}) \quad \text{la raíz sale dividiendo del logaritmo}$$

$$\log I = (n/1200) \times \log 2 ; \quad n \text{ (nº de cents)} = 1200 \times (\log I / \log 2)$$

Podemos calcular cuantos cents tienen algunos intervalos como la 2ª M pitagórica o la coma sintónica:

- 2ª M pitagórica (9/8) = 1200 x (log(9/8) / log2) = 203.9 cents.
- Coma sintónica (81/80) = 1200 x (log(81/80) / log2) = 21.5 cents.
- El mínimo detectable de 0.4% = 1200 x (log1.004 / log2) = 6.9 cents.
- La 5ª justa (3/2) = 1200 x (log(3/2) / log2) = 702 cents.
- La 3ª M aristogénica (5/4) = 1200 x (log(5/4) / log2) = 386.3 cents, etc.

Intervalo	Equitemperada	Pitágoras	Aristógenes
2ª m	100	90.2	111.7
2ª M	200	203.9	203.9 / 182.4 (tono pequeño)
3ª M	400	407.8	386.3
5ª	700	702	702 / 680.5
8ª	1200	1200	1200



## 6. CONSONANCIA Y DISONANCIA

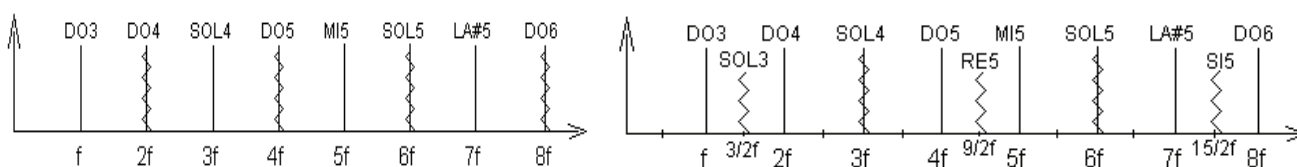
### Coincidencia de armónicos en intervalos musicales

Bajo el punto de vista musical los conceptos de consonancia y disonancia tienen mucha importancia. Nosotros nos limitaremos a estudiar los aspectos más básicos y sencillos que los determinan.

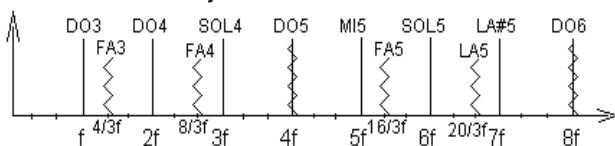
Un intervalo o un acorde de dos notas o sonidos lo consideraremos consonante si no suena áspero y nos parece agradable y será disonante cuando suene áspero y de alguna manera nos parezca que los sonidos friccionan. Las consonancias se asocian a estados relajados o producen esa sensación y las disonancias producen cierta tensión. Un intento para explorar los aspectos de la consonancia y disonancia se hizo a través de experimentos en coincidencia de armónicos.

**Tindall** (1820-1893) observó que era bueno que hubiese coincidencia de armónicos y vio que los intervalos consonantes en general eran aquellos que tenían relaciones sencillas de frecuencias.

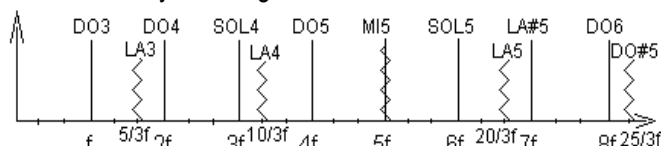
La relación de octava justa  $f_2/f_1=2/1$  es la más consonante de todas, hay una coincidencia máxima de armónicos y es por esto por lo que las notas que tienen un intervalo de octava nos suenan muy parecidas. La relación de 5ª justa es  $f_2/f_1=3/2$ , en este intervalo coinciden muchos armónicos pero aparecen algunos nuevos que no estaban en la 8ª.



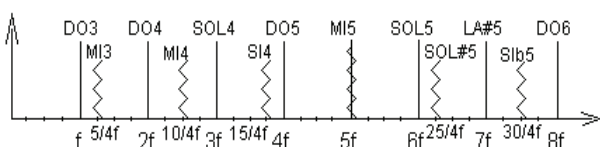
El intervalo de 4ª justa es  $f_2/f_1=4/3$ .



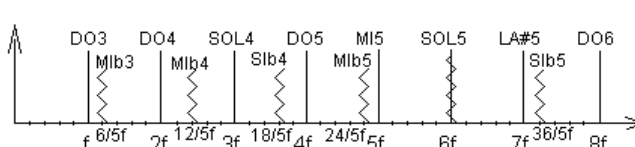
El de 6ª Mayor aristogénica es  $f_2/f_1=5/3$ .



La 3ª Mayor aristogénica es  $f_2/f_1=5/4$ .



La 3ª menor es  $f_2/f_1=6/5$ .



.Las consonancias perfectas son los intervalos de 8ª, 5ª y 4ª.

.Consonancias imperfectas se consideran la 6ª M, 3ª M, 3ª m, 6ª m.

.Las disonancias que tenemos entre los intervalos son la 7ª M, 7ª m, 2ª m y 2ª M.

La suma del denominador y del numerador del número asociado al intervalo se hace mayor cuanto más disonante es el intervalo en cuestión. Ésta es la regla que pensó Tindall pero en algunos casos falla como en la 4ª aumentada DO-FA#. Un tritono es una semiconsonancia que en el sistema de Aristógenes tiene el valor de  $f \times 3/2 \times 15/16 = 45/32 = 1.40625$  y según la **teoría de Tindall** tendría que ser un intervalo más disonante que una 2ª m. En el sistema de Pitágoras la 3ª M vale  $81/64$  también muy disonante según Tindall. Este intervalo pitagórico suena un poco desafinado pero no es más disonante que una 2ª m.

La **teoría de Helmholtz** (1821-1894) puso las cosas en orden, rebuscó en la realidad y fue al fondo de la cuestión. La causa de la disonancia es, según Helmholtz, el número de batidos que se producen entre los armónicos de una y otra nota que se ejecutan simultáneamente. Un acorde está compuesto de varias notas y cada nota que emerge del instrumento lo hace acompañada de toda la serie de armónicos que puede generar la cuerda. Si los armónicos de ambas notas están muy cercanos en frecuencia se producen batidos que percibimos como una sensación de disonancia.

En los sonidos graves se producen batidos entre los dos fundamentales de un intervalo de 2ª M, esto no ocurre si subimos unas cuantas octavas ese mismo intervalo, aunque sonará algo áspero:

$LA_1=55$  Hz ;  $SI_2=55 \times (9/8)=61.87$  Hz nos dan 6.8 batidos.  
 $LA_6=1760$  Hz ;  $SI_6=1760 \times (9/8)=1980$  Hz podemos escuchar 220 batidos?

Las cuerdas del piano tienen pequeñas inarmonicidades que hacen que los parciales de éstas no sean exactamente el doble, triple, etc. de la frecuencia fundamental. Cuando se afina un piano por octavas se tienen en cuenta ese segundo "armónico" que es un poco mayor que  $2f$  y las octavas quedan un poco mayores de lo matemáticamente correcto.

### Anchura crítica de banda ACB

Plomp y otros amigos crearon el concepto de la ACB para el oído y esto nos vale para poder entender todo lo relativo a las disonancias.

Suponemos un sonido puro cualquiera de frecuencia  $f$ , vamos a ver en que momento otro sonido escuchado junto a este primero suena áspero. Trabajamos con sonidos puros y los vamos juntando en frecuencia hasta que los sonidos empiezan a producir sensación de aspereza entre sí. La distancia mínima antes de que aparezcan fricciones será la Anchura Crítica de Banda: ACB. El análisis lo hacemos en toda la gama de frecuencias y con muchos oyentes. Al final se obtienen los siguientes resultados aproximados para la ACB:

Si  $f < 500$  hz. ACB = 100 hz.  
 Si  $f > 500$  hz. ACB = 3ª m

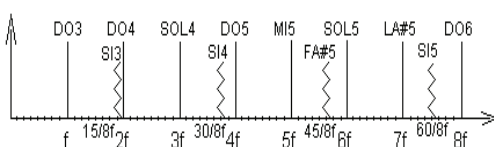
Un sonido de 50 Hz tiene una ACB de 100 hz, libra otro de 150 Hz y el intervalo que hay entre ellos es de una 12ª que podemos calcular dividiendo las respectivas frecuencias:  $150/50=3$ , mayor que una octava (Si le quitamos la 8ª nos queda el intervalo que pasa de la 8ª:  $3/2$ ,  $8^a + 5^a = 12^a$ ). Para un sonido de 100 Hz, ACB=100 Hz también, el que librará con él será el de 200 Hz y entre los dos forman un intervalo de 8ª,  $200/100=2$ . Un sonido de 200 Hz, ACB=100 hz, tiene como frontera a otro de 300 Hz y forman un intervalo de 5ª ya que  $300/200=3/2$ . Con el de 300 Hz librará el de 400 Hz,  $400/300=4/3$ , tenemos una 4ª y si consideramos el sonido de 400 Hz libra el de 500 Hz que forman una 3ª M,  $500/400=5/4$ , y por último, el sonido de 500 Hz libra con otro de 600 Hz con el que forma un intervalo de 3ª m,  $600/500=6/5$  y a partir de aquí el intervalo este se mantiene y lo que irá cambiando será el número de Hz que hay en la anchura crítica de banda de los sonidos en cuestión. La ACB es a partir de 500 Hz la quinta parte de la frecuencia considerada:

$$f + ACB = f \times 6/5 ; ACB = 6f/5 - f ; ACB = f/5$$



Hasta los 500 Hz los armónicos que se encuentren a una distancia menor de 100 Hz serán disonantes y a partir de estos 500 Hz los intervalos menores de una 3ª m serán disonantes. **Las disonancias en los acordes aparecen entre los diferentes armónicos que intervienen en las series armónicas naturales de las notas que componen el acorde.**

En las octavas bajas, las frecuencias graves, el fundamental es disonante con algunos de los componentes de su serie armónica. Una nota de un piano de 55 Hz, un  $LA_1$ , tiene armónicos con frecuencias 110, 165, 220, 275 Hz, etc. Si calculamos la ACB de 55 Hz vemos como el que libra es el sonido de 155 Hz con lo que el segundo armónico de la nota está dentro de la ACB y la disonancia es apreciable en la nota misma.



Un acorde de 7ª M es disonante aunque la lógica nos diga lo contrario ya que los fundamentales de las dos notas están suficientemente separados en frecuencia como para no generar fricciones. Sin embargo si analizamos en detalle los armónicos de ambas notas vemos como el fundamental de la segunda nota está muy cerca del segundo armónico de la primera nota.

En general, los armónicos superiores de un sonido (a partir del 6º) tienen intervalos inferiores a una 3ª m y generarán fricciones pero la amplitud de estos es suficientemente pequeña como para que se aprecien muy poco. Solo fricciónarán los armónicos que tengan suficiente amplitud y esta amplitud ha de ser parecida entre ellas.

Un buen instrumento interesa que tenga un filtro muy diferenciado con pocas resonancias de amplitud considerable y separadas al menos la ACB, con esto conseguimos buena sonoridad y un timbre claro y limpio.

Vamos a calcular las frecuencias de algunas notas y su ACB:

	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
Pitágoras:	9/8	9/8	256/243	9/8	9/8	9/8	256/243	
Aristógenes:	9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15	

RE#<sub>5</sub> aristogénico =  $LA_4 \times 2 \times (9/10) \times (8/9) \times (15/16) \times (15/16) = 618.75$  Hz  
 ACB=3ª m,  $618.75/5=123.75$ , libra la nota de frecuencia 742.5 Hz, un FA#<sub>5</sub>

SI<sub>b2</sub> pitagórico =  $LA_4 \times (1/2) \times (1/2) \times (256/243) = 115.88$  Hz  
 ACB=100 Hz libra la nota de frecuencia 215.88 Hz  
 con un intervalo  $215.88/115.88=1.86$  será una 7ª M, más o menos un LA<sub>3</sub> (220Hz)

SOL<sub>b3</sub> aristogénico =  $LA_4 \times (1/2) \times (9/10) \times (8/9) \times (16/15) = 187.73$  Hz  
 ACB=100 Hz libra la nota de frecuencia 287.73 Hz.  
 $287.73/187.73=1.53$  un poco más que una 5ª, un RE<sub>b4</sub>

DO#<sub>3</sub> equitemperado =  $LA_4 \times (1/2) \times (1/2) \times (12\sqrt{2})^4 = 138.59$  Hz  
 ACB=100 Hz libra la nota de frecuencia 238.59 Hz  
 $238.59/138.59=1.72$  es un poco menos de una 7ª m, SI<sub>3</sub>

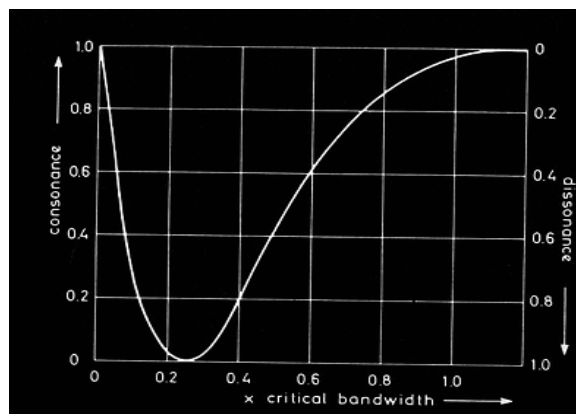
### Variación de la consonancia dentro de la ACB

El que dos frecuencias separadas la ACB produzcan o no asperezas es algo subjetivo. Para algunos músicos los tonos librarán y para otros no. Este límite es un poco ambiguo. Ahora vamos a ver que pasa cuando dos tonos están dentro de la ACB calculada.

Cuando las dos frecuencias se encuentran a una distancia que es un cuarto de la ACB considerada entonces la aspereza que se produce es máxima y va disminuyendo según se acercan los tonos hasta que coinciden. Plomp y su cuadrilla cuantificaron todos estos resultados en la siguiente tabla:

Fracción ACB (X)	Consonancia (Y)	0	0.25	ACB	1
0.00	1.00				
0.10	0.30				
0.20	0.03				
0.25	0.00				
0.30	0.03				
0.40	0.20				
0.50	0.40				
0.60	0.60				
0.70	0.75				
0.80	0.85				
0.90	0.90				
1.00	0.95				
1.10	1.00				

máx. aspereza                      ausencia de fricción

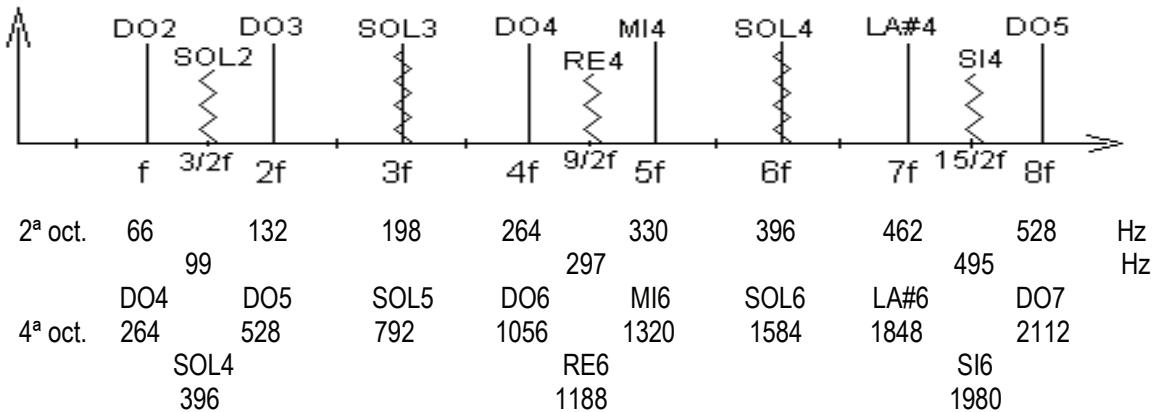


Si tenemos un sonido de 100 Hz, ACB=100 Hz, entonces librará el sonido de 200 Hz. A un cuarto de la ACB se produce la máxima aspereza, a 25 Hz del sonido de 100 Hz por lo que los dos sonidos de 100 y 125 Hz tendrán aspereza máxima y entre ellos existe un intervalo de  $125/100=5/4=1.25$ , una 3ª M!

Los buenos instrumentos se caracterizan por un timbre limpio, un sonido cristalino sin fricciones extrañas. Los buenos violines, por ejemplo, tienen una caja armónica (filtro) que evita amplificar armónicos muy juntos dentro de la ACB, tienen las resonancias separadas al menos la ACB así se eliminan los armónicos que pudieran causar alguna fricción. Si la caja de resonancia amplifica todos los armónicos que le llegan de la cuerda el timbre resulta áspero.

**Evaluación de la consonancia**

Vamos a ver como se comporta una 5ª justa en la segunda octava. Consideramos únicamente los 8 primeros armónicos de cada nota y supondremos, lo que no es cierto, que todos los armónicos tienen la misma amplitud.



El fundamental DO<sub>2</sub>=66 Hz libra con otro sonido de 166 Hz ya que la ACB=100 Hz entonces fricciona con el fundamental de la segunda nota SOL<sub>2</sub>=99 Hz y con el segundo armónico de la primera nota DO<sub>3</sub>=132 Hz.

Intervalo	ACB	frac. ACB (f <sub>2</sub> -f <sub>1</sub> )/ACB	Contribución aspereza (1-consonancia)
DO <sub>2</sub> SOL <sub>2</sub>	100 Hz	33/100 = 0.33	1 - 0.03 = 0.97
DO <sub>2</sub> DO <sub>3</sub>	100 Hz	66/100 = 0.66	1 - 0.75 = 0.25
SOL <sub>2</sub> DO <sub>3</sub>	100 Hz	33/100 = 0.33	0.97
SOL <sub>2</sub> SOL <sub>3</sub>	100 Hz	99/100 = 0.99	1 - 0.95 = 0.05
DO <sub>3</sub> SOL <sub>3</sub>	100 Hz	66/100 = 0.66	0.25

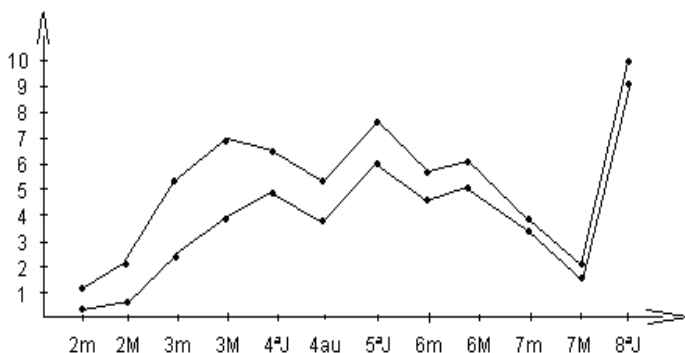
Tenemos entre los respectivos armónicos que friccionan entre sí seis casos como el primero, siete como el segundo y nueve como el cuarto y sumando todas las contribuciones para la aspereza obtenemos 7.77 para este intervalo de 5ª justa en la segunda octava. Si hacemos lo mismo en la cuarta octava obtenemos una contribución a la aspereza de 3.12. En la medida en que subimos en 8ª, y en frecuencia, los intervalos son menos disonantes, o más consonantes.

En la cuarta octava el primer DO de frecuencia 264 Hz es el DO<sub>4</sub> y tenemos la siguiente tabla para los armónicos y su contribución a la aspereza, los primeros armónicos libran todos entre sí, siendo los dos primeros que friccionan el DO<sub>6</sub> y el RE<sub>6</sub>.

Intervalo	ACB (f/5)	frac. ACB (f <sub>2</sub> -f <sub>1</sub> )/ACB	Contribución a la aspereza
DO <sub>6</sub> RE <sub>6</sub>	4f/5	((9/2)f-4f)/(4/5f)=0.625	0.4
RE <sub>6</sub> MI <sub>6</sub>	(9/2f)/5	(5f-(9/2)f)/(9/10f)=0.55	0.5

Y así con todos los que no libran la ACB, total, para conseguir un número que nos dice lo áspero o disonante que es este acorde. Al final se consigue una tabla con los datos sobre la consonancia de los diferentes acordes en dos octavas distintas.

	2m	2M	3m	3M	4ªJ	4au	5ªJ	6m	6M	7m	7M	8ªJ
Octava 4	1.2	2.2	5.6	6.9	6.5	5.3	7.3	5.4	5.8	3.8	2.1	9.9
Octava 2	0.3	0.6	2.4	3.9	4.7	3.8	5.9	4.5	4.9	3.6	1.5	9.2



Curva superior: 4ª octava  
Curva inferior: 2ª octava

Por la teoría de Tindall este fenómeno de los intervalos no es explicable. Tal vez se puede explicar mejor por la teoría de batidos de Helmholtz. La 7ªM y la 7ªm son disonantes pues generan intervalos de 2ªM y 2ªm entre los armónicos segundos de la primera nota y la fundamental de la segunda.

Las octavas altas dan más consonancias que las bajas al ser las frecuencias mayores y generarse menos batidos. En la 4ª octava la 3ªm no queda fuera de la ACB aunque suena bien y libra bastante.  $DO_4=264$  Hz y  $MI_4=330$  Hz no libran estas frecuencias fundamentales pero los demás armónicos sí.

Se pueden estudiar también todo tipo de acordes formados por tres o más notas y la dinámica será la misma que en el caso de dos notas. Se puede ver la separación entre los armónicos de las diferentes notas, lo mucho o poco que friccionan entre sí y de esta manera evaluar lo consonantes o disonantes que son los diferentes acordes mayores y menores. El acorde de DO mayor, DO-MI-SOL, es más consonante que el acorde de DO menor, DO-MI♭-SOL.

Si estudiamos lo que ocurre con las diferentes escalas y afinaciones vemos como en la escala de Pitágoras las relaciones que aparecen dan acordes en los que los diferentes armónicos de una nota se encuentran cerca de los armónicos de las otras notas y generan batidos y disonancias, sobre todo en la 3ª Mayor.

La disonancia puede aparecer sin que apreciemos un número de batidos concreto, solo necesitamos que dos tonos puros estén lo suficientemente cerca en frecuencia (100 Hz o 3ªm). Si juntamos estos tonos o sonidos los batidos son apreciables y la disonancia es evidente.

Con un ordenador podemos jugar con todas estas cosas y crear música electrónica evitando disonancias extrañas o generarlas actuando sobre los armónicos "artificiales" de cada nota, aunque esto puede crear fenómenos extraños de inarmonicidades y pérdida de sensación de altura de tono ya que la altura de tono definida solo la percibimos si los tonos que nos llegan son armónicos entre si.

## 7. RESONANCIAS

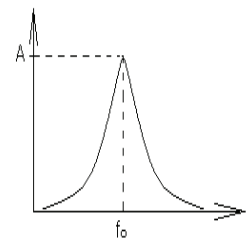
### Definición de resonancia

Bajo el punto de vista acústico las resonancias son el eje central del estudio de los instrumentos musicales y de la acústica de la música. Un instrumento tendrá un **timbre** determinado, entre otras cosas, en función de las **resonancias** que tenga. Estas resonancias tienen su base en las formas naturales de vibrar del sistema y vienen determinadas por la geometría del instrumento (forma y tamaño) y por las características del material con el que está construido. **Podemos definir las resonancias como los máximos vibracionales del sistema frente a una fuerza periódica exterior suministrada.**

Cada sistema elástico, empezando por el más sencillo que es capaz de oscilar formado por un muelle y una masa, tiene sus "maneras de moverse", unos modos de vibración naturales a ciertas frecuencias que dependerán de las características del sistema. En el caso del muelle, la masa asociada y la rigidez del muelle. Los sistemas más simples tienen modos de vibración sencillos y a medida que los sistemas se complican, los modos de vibración lo harán también. Podemos decir que la geometría y los materiales de un sistema definen sus formas naturales de moverse y de vibrar.

Los sistemas elásticos vibran si los desplazamos de su punto de equilibrio. En el caso que nos ocupa, los sistemas también vibrarán si se les suministra una **fuerza externa periódica** u oscilante, como lo es la vibración que le llega a la caja armónica desde las cuerdas a través del puente. Para que exista la resonancia tiene que existir un modo de vibración natural que en un sistema es una forma de vibración de todas sus partes a una determinada frecuencia  $f_0$ . Nos hace falta también la fuerza exterior sinusoidal periódica, en principio con una frecuencia cualquiera; cuando la frecuencia de la fuerza exterior coincide con  $f_0$  tendremos un **máximo vibracional** del sistema y diremos que el sistema ha entrado en resonancia. En este momento el sistema alcanza la máxima velocidad con la mínima fuerza suministrada.

La **admitancia** se define como la relación entre la velocidad que alcanza el sistema y la fuerza suministrada al mismo  $A=V/F$ . En la resonancia se produce un máximo de la velocidad ante un estímulo exterior, se produce un máximo en la admitancia. La velocidad que alcanza el sistema es un dato importante ya que a mayor velocidad, manteniendo la frecuencia, tendremos mayor amplitud y en consecuencia mayor presión sonora: más sonido. La admitancia (que depende de la frecuencia) se puede entender como la capacidad que tiene el sistema de moverse ante una fuerza oscilante exterior aplicada. Si a un sistema le proporcionamos, a una frecuencia determinada, una fuerza grande y la velocidad que alcanzan las diferentes partes es pequeña entonces la admitancia del sistema a esa frecuencia es pequeña. La **impedancia** se define como el inverso de la admitancia. Cuanto mayor es la admitancia menor es la impedancia.

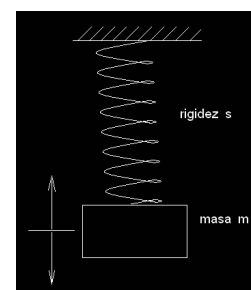


En los instrumentos musicales este fenómeno tiene una gran importancia. Las resonancias son la esencia del sonido y del timbre que percibimos. Son las que hacen posible que el filtro (caja o tapa armónica) sea capaz de mover aire suficiente como para poder ser escuchadas las vibraciones que llegan de la fuente (los armónicos de la cuerda). Como sabemos, la fuente es capaz de transmitir al filtro muy poca energía pero ésta es suficiente como para poner en marcha las resonancias del filtro y obtenemos así el sonido complejo que llega felizmente hasta nuestros oídos.

### Frecuencias de resonancia

Todos los sistemas que podamos imaginar, que tengan capacidad para vibrar por la elasticidad de sus materiales tendrán unas maneras naturales de moverse. El sistema más sencillo compuesto por una masa y un muelle "se mueve" de una sola manera. El sistema este tiene una única frecuencia de resonancia que viene determinada por la rigidez  $s$  del muelle y la masa  $m$  acoplada al muelle. Solo oscila a esta frecuencia con mayor o menor amplitud dependiendo de la cantidad de energía suministrada.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}}$$



Si estiramos el muelle, éste tira con una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa, desde su punto de equilibrio, y proporcional también a la constante de recuperación del muelle o rigidez  $s$ ; esta fuerza acelera la masa y el muelle tiende a recuperar su posición de equilibrio. La inercia hace que el sistema supere este punto produciéndose la oscilación. Dependiendo del menor o mayor coeficiente de amortiguación de todo el sistema las oscilaciones se mantendrán más o menos en el tiempo.

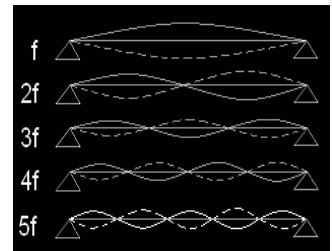
Los sistemas que estudiamos en acústica son algo más complejos que este sistema formado por la masa y el muelle. Según se van complicando estos sistemas geométrica y estructuralmente los modos naturales de vibración también se van haciendo más complejos. Estas frecuencias de vibración se pueden calcular matemáticamente conociendo como actúan las fuerzas internas y calculando la ecuación diferencial del movimiento.

### Frecuencias de resonancia en cuerdas

El siguiente sistema que estudiaremos, con capacidad de generar vibraciones, es la cuerda en tensión. Como hemos visto en capítulos anteriores Pitágoras se percató de los diferentes modos de vibración de las cuerdas que hoy en día conocemos como armónicos y que se corresponden con la serie armónica natural. Pitágoras y su cuadrilla experimentaron con la tensión ejercida mediante pesos y longitudes diferentes observando como el sistema ofrecía diferentes frecuencias.

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho_{lin}}}$$

En esta fórmula aparecen tres factores que determinan las frecuencias de vibración de la cuerda: la **longitud de cuerda vibrante** L o "tiro", la **tensión** aplicada T y la **densidad lineal**  $\rho_{lin}$  que nos indica la masa de la cuerda por unidad de longitud (kilogramos por cada metro). El número n toma los valores 1, 2, 3, 4, 5, etc. Con n=1 obtenemos la frecuencia fundamental y con n=2, 3, 4, etc. los demás armónicos superiores. Si la cuerda se comporta de manera ideal las frecuencias de resonancia reales de los diferentes modos de vibración se ajustan a la serie armónica natural f, 2f, 3f, 4f, 5f, etc. Siendo f la frecuencia fundamental que depende de la tensión, la longitud de cuerda vibrante y la densidad lineal.

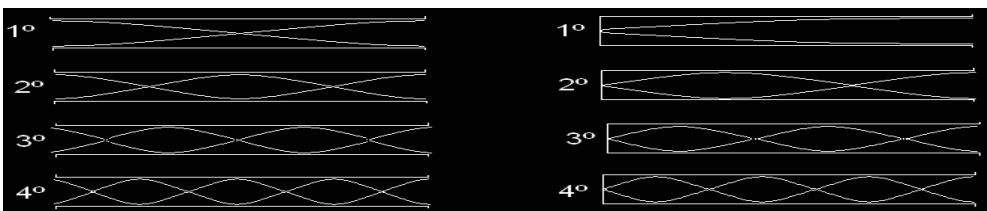


Si queremos afinar una cuerda determinada lo que hacemos es aumentar o disminuir la tensión de la misma mediante el mecanismo de la clavija. Un aumento de la tensión nos da mayor frecuencia, mayor altura de tono y con una disminución de la tensión obtenemos una frecuencia menor, una altura de tono menor. Una longitud de cuerda vibrante menor nos dará mayor altura de tono y viceversa, hecho que podemos comprobar con los trastes de una guitarra.

El fabricante controla la densidad lineal de la cuerda mediante diferentes entorchados, dato que generalmente no ofrecen pero se puede calcular pesando y midiendo la cuerda en cuestión.

### Frecuencias de resonancia en tubos

Dentro de las diferentes clases de tubos o columnas de aire tenemos dos que acústicamente nos interesan: los tubos **Abiertos-Abiertos** y los **Cerrados-Abiertos**. Los tubos tienen unos modos de vibración cuyas frecuencias vienen determinadas únicamente por la longitud del tubo y por lo que el aire se encuentre en cada extremo (el diámetro influye en otros parámetros que veremos): no es lo mismo que el extremo esté cerrado o abierto. En un extremo cerrado el aire se encuentra con una pared y en ese punto se forma un punto nodal, zona de máxima presión y velocidad nula mientras que en el extremo abierto, el aire se encuentra con un medio parecido con alguna diferencia de densidad, aquí tenemos presión mínima y velocidad máxima. En la embocadura del clarinete se forma un máximo de presión y velocidad nula, se considera cerrado, por la forma de la boquilla y por cómo entra el aire.



$$\text{Abierto-Abierto} \quad f = \frac{nC}{2L}$$

$$\text{Cerrado-Abierto} \quad f = \frac{(2n-1)C}{4L}$$

Las frecuencias de los modos las obtenemos sustituyendo n por 1, 2, 3, etc.

La fórmula para la frecuencia la obtenemos de una de las fórmulas generales para las ondas que nos indica que la frecuencia viene dada por relación entre la velocidad de propagación de la perturbación en ese medio y la longitud de onda:

$$f = \frac{C}{\lambda}$$

Para calcular las diferentes frecuencias de los modos de vibración tenemos que ver cuantas longitudes de tubo se necesitan para que se forme una longitud de onda. En este caso cada longitud de onda es la distancia entre tres puntos nodales o tres crestas. Vamos a ver que pasa con el 1º modo de vibración del tubo Abierto-Abierto. Una longitud de onda se forma en dos longitudes de tubo, por lo que  $\lambda=2L$ . En el 2º modo de vibración la longitud de onda se forma en una longitud de tubo. En el tercero una longitud de onda se forma en 2/3 de la longitud del tubo, por lo que solo tenemos que sustituir  $\lambda$  por  $2L$ , por  $L$  y por  $2/3L$ , nos queda:

$$f_1 = \frac{C}{2L} \quad f_2 = \frac{C}{L} = \frac{2}{2} \frac{C}{L} = 2 \frac{C}{2L} = 2f_1 \quad f_3 = \frac{C}{\frac{2}{3}L} = 3 \frac{C}{2L} = 3f_1$$

En el 1º modo del tubo Cerrado-Abierto la longitud de onda se establece en cuatro longitudes de tubo, en el 2º modo necesita 4/3 de longitud de tubo, en el 3º modo necesita 4/5 de tubo, por lo que las frecuencias quedan:

$$f_1 = \frac{C}{4L} \quad f_2 = \frac{C}{\frac{4}{3}L} = 3 \frac{C}{4L} = 3f_1 \quad f_3 = \frac{C}{\frac{4}{5}L} = 5 \frac{C}{4L} = 5f_1$$

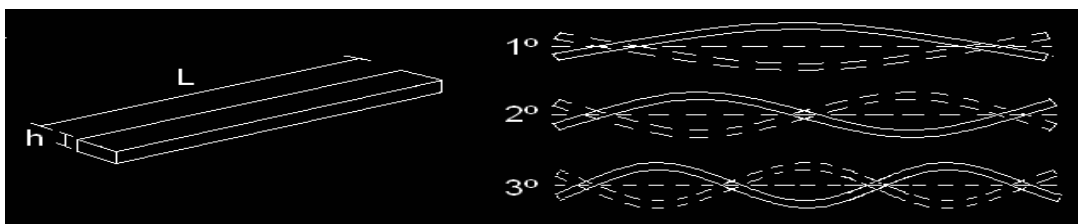
En el tubo A-A, como ocurre en la flauta travesera o en el txistu, se forman modos de vibración con todas las frecuencias múltiplo de la fundamental:  $f, 2f, 3f, \dots$ , los mismos que en la serie armónica natural, mientras que en los C-A (flauta de Pan, clarinete, etc.) solo se forman los modos que corresponden a las frecuencias impares de la serie armónica natural:  $f, 3f, 5f, \dots$ . Este hecho lo podemos experimentar obteniendo los diferentes armónicos de una flauta, trompeta (toda la serie armónica), flauta de pan (los impares) o cualquiera de los instrumentos de viento: aumentamos la fuerza de soplado y aparecen los armónicos con los correspondientes intervalos de la serie armónica natural.

### Frecuencias de resonancia en tablas y placas

Una tabla de material elástico también tiene sus modos de vibración naturales a determinadas frecuencias que se pueden calcular conociendo las características geométricas y las internas del material. Una placa rectangular cuya longitud sea al menos 10 veces mayor que su anchura se puede considerar como una tabla unidimensional. Las frecuencias serán proporcionales al **espesor  $h$**  de la tabla y a la raíz cuadrada del **módulo de Young  $E$**  de la madera e inversamente proporcionales al cuadrado de la **longitud  $L$**  y a la raíz cuadrada de la **densidad  $\rho$** . Para la frecuencia fundamental tenemos:

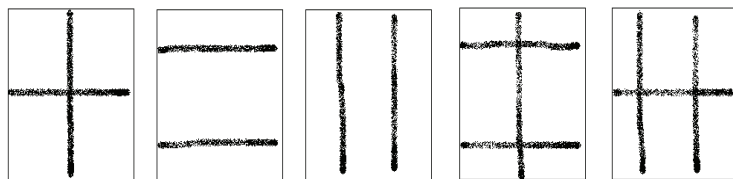
$$f \approx \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

En esta fórmula  $E$  es el módulo de Young, que nos da una idea de lo que cuesta estirar y encoger el material, y  $\rho$  es la densidad volumétrica del material (kilogramos por unidad de volumen). En una tabla Libre-Libre tenemos unos modos de vibración con puntos nodales en los que la velocidad es nula y zonas en las que la velocidad de vibración es máxima.

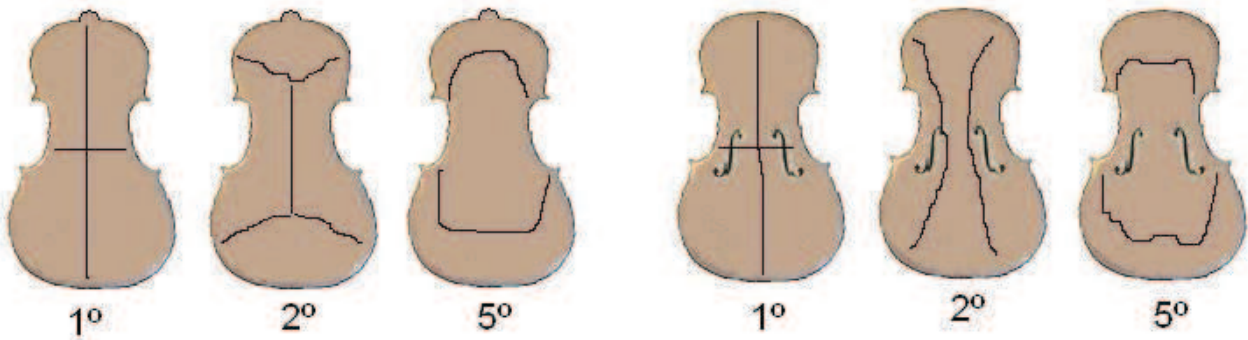


Si la tabla tiene una anchura no despreciable frente a la longitud tenemos una placa con modos de vibración en dos dimensiones. En este caso las zonas de vibración nula serán líneas y los modos de vibración forman figuras sencillas.

Las tapas y fondos de un violín entran en esta categoría de sistemas. Los modos de vibración y las frecuencias asociadas vienen determinadas por las dimensiones de las placas, las características de la madera (módulo de Young y densidad), los diferentes abovedados y los espesores que el luthier quiera darles. Los modos #1, #2 y #5 de tapas y fondos se consideran, entre otros muchos factores, muy importantes e influyentes en la calidad tonal del instrumento ensamblado.





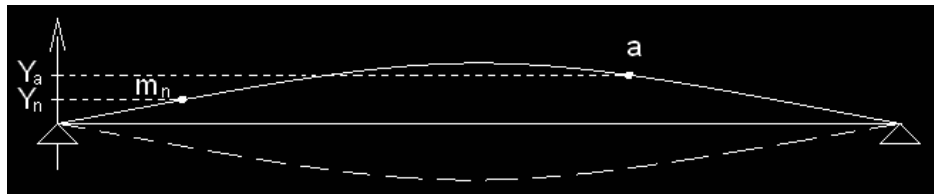


**Masa efectiva y Rigidez efectiva. Factor de calidad y Función de transferencia**

En los sistemas musicales podemos utilizar estos dos conceptos y comparar así cada punto del sistema con el modelo simplificado que conocemos de muelle y masa.

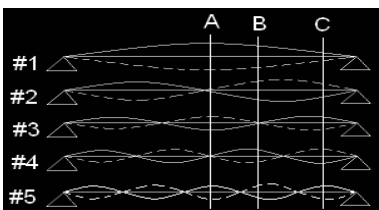
Un elemento de masa  $m$  situado en el punto  $a$  tiene para una determinada resonancia una amplitud  $Y(a)$ , nosotros vamos a calcular la masa efectiva para ese punto mediante una formula. El concepto de masa efectiva se puede aplicar a todos los sistemas y a cada modo de vibración diferente. Consideramos una cuerda que dividimos en pequeñas masas cada cual con su amplitud de vibración correspondiente. Multiplicamos cada masa elemento de  $m_n$  por el cuadrado de su amplitud  $Y_n$  y sumamos. La masa efectiva en el punto  $a$  será:

$$M_e = \frac{\sum(m_n Y_n^2)}{Y_a^2}$$



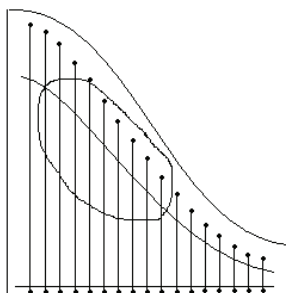
De la formula se puede ver que aquellos puntos situados en un máximo vibracional de una resonancia determinada tendrán amplitud máxima y por consiguiente Masa efectiva mínima y los puntos situados en una línea o punto nodal tienen amplitud nula y Masa efectiva infinita. El sistema lo dividimos en trocitos y consideramos el comportamiento de cada punto como el de un muelle con su masa y su rigidez.

Cuanta menos masa efectiva tenga ese punto más fácil será moverlo con poca fuerza. Si aplicamos este concepto a las tablas armónicas es en estos puntos en los que será conveniente situar el puente del instrumento, que es el intermediario a través del cual pasan a la caja o tabla armónica todas las vibraciones de las cuerdas.



Al excitar el sistema en el punto A los modos #1, #3 y #5 suenan mucho y el modo #2 no aparece. Si golpeamos en el punto B el primer modo #1 suena un poco menos, #2 suena bastante y #3 nada; #4 y #5 aparecen también. Si golpeamos la cuerda más cerca del puente, punto C, se potencian cada vez modos de vibración más altos.

La rigidez efectiva se puede calcular también mediante una formula algo complicada y nos dará una idea de la rigidez que tienen cada punto aislado del sistema. En cada punto del sistema la frecuencia de vibración es la misma por lo que la relación  $S_e/M_e$  se mantiene.

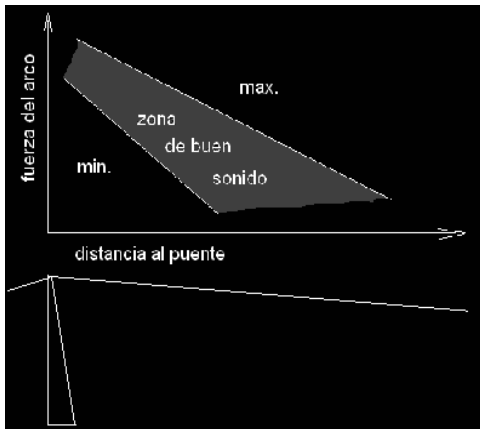


Consideramos el caso de la tabla de armonía de un piano. Cerca de la línea nodal del modo fundamental la masa efectiva es muy grande por lo que la rigidez efectiva también será grande ya que la frecuencia de modo no ha de cambiar y  $f_0 \approx \sqrt{S_e/M_e}$ ; para la admitancia tenemos  $A = 1/\sqrt{S_e M_e}$  y la impedancia  $Z = \sqrt{S_e M_e}$ , tiene un valor muy grande, por lo que el sistema es difícil de mover en estos puntos y no tiene mucho sentido poner el puente en estos puntos o líneas nodales. El puente del piano lo situaremos en el máximo de amplitud vibracional del modo fundamental y mejor estará colocado cuantos más máximos coincidan con la ubicación del puente pues así conseguiremos excitar un mayor número de resonancias.

### Formas generales de excitación de las resonancias: Mantenidoas e instantáneas

Hay que buscar mecanismos para mantener la vibración del sistema durante el tiempo que queramos. Se trata de buscar mecanismos que transformen un movimiento continuo en uno periódico oscilante. Los más importantes que vimos en los primeros capítulos son el mecanismo de arco y el de viento. Como vimos, un aumento de la velocidad del aire en un canal estrecho induce una disminución de la presión (Principio de Bernoulli), se acercan las laminas, labios o pestañas y gracias a la elasticidad de los materiales se produce la vibración.

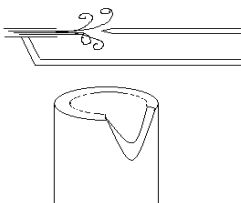
En los instrumentos de arco es muy importante el tamaño de los "dientes" de esta pequeña sierra que serán las escamas de las crines del arco junto con la resina que "muerde" las cuerdas. El agarre y el grano de estas resinas es un factor importante para obtener de la cuerda armónicos más ricos. La finura de los pelos con los que se encerda el arco también será importante. Para arcos de contrabajo utilizaremos pelo más grueso y grano de resina mayor ya que las frecuencias que queremos obtener de las cuerdas de un contrabajo son más bajas y necesitamos una "sierra" con "dientes" más grandes.



La perturbación generada en un punto de la cuerda por el arco se desplaza por toda la cuerda a una velocidad igual a  $\sqrt{T/\rho_L}$ . Existe una zona óptima de trabajo del arco sobre la cuerda en relación con el puente, que dependerá de la fuerza que se ejerce con el arco sobre la cuerda. Si tocamos demasiado lejos del puente el propio arco amortigua y atenúa las vibraciones de la cuerda y el sonido se empobrece. Cuanto más cerca del puente toquemos más fuerza tenemos que suministrar.

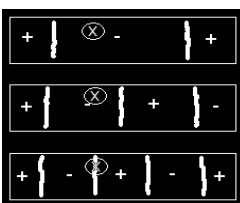
En los instrumentos de viento las lengüetas o los labios que generan la vibración cumplen una función muy importante. Las resonancias que se generan en los tubos o columnas de aire correspondientes tienen frecuencias determinadas por la longitud de estos tubos y las lengüetas que trabajan bajo el efecto de Bernoulli vibrarán a una frecuencia igual a la de la resonancia que se pone en marcha. Se produce una **realimentación**. Es

de vital importancia tener una lengüeta adecuada para cada tubo. Las cañas para un clarinete tenor serán más duras que las que necesita un clarinete bajo. En los instrumentos de boquilla pasa algo parecido con los labios. Las notas más graves se dan con los labios más relajados y a medida que aumenta el tono o frecuencia, hay que tensar los labios para que esa resonancia y esa nota puedan generarse.



Existe otro mecanismo de viento **de bisel** que se da en las flautas y tubos de órgano. En este caso el flujo de aire que sale de la boca o portavento comienza a oscilar y si se encuentra con un bisel fino se rompe y se generan unas turbulencias que serán las que ponen en marcha las resonancias del tubo. Con poca velocidad del viento se generan turbulencias de tamaño grande, adecuadas para las resonancias de baja frecuencia, en cambio para las altas frecuencias necesitamos velocidad mayor del viento para generar turbulencias pequeñas que pondrán en marcha las resonancias de alta frecuencia.

Existe otra forma de excitar las resonancias de un sistema tan importante como las que hemos visto que son las **instantáneas**. En este grupo podemos incluir la percusión y el punteado o pulsado de los sistemas. Si damos un golpe en una cuerda o una tabla generamos una perturbación en el sistema que pone en marcha las diferentes resonancias. Suministrar un golpe es semejante a suministrar un espectro continuo de frecuencias o ruido blanco. Es muy importante la zona de impacto o punteado ya que dependerá de esto el que unas resonancias se activen y otras no. En general buscaremos aquellos lugares que sean máximo vibracional para un número grande de resonancias, de esta forma el timbre final del instrumento será más rico al tener más componentes o armónicos.

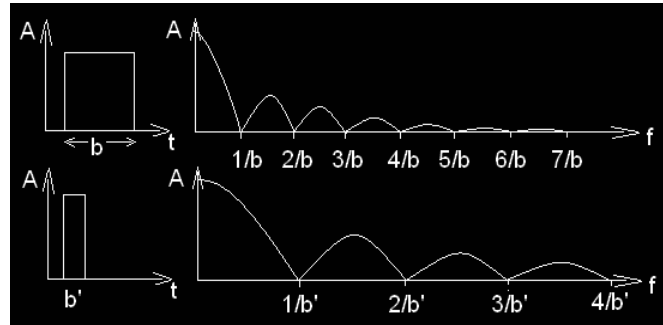


Si golpeamos en una determinada zona excitamos los modos que tienen en esa zona un máximo de vibración. En las tablas libres las esquinas son zonas de máximo para casi todas las resonancias. Golpeando en esta zona el sonido será más brillante. Una cuerda podemos percutirla o pulsarla cerca del puente o lejos. Pulsando en medio de la cuerda ponemos en marcha la primera de las resonancias y el sonido será más oscuro y dulce mientras que si pulsamos cerca del puente activamos resonancias más altas y el sonido que conseguimos es más brillante.

El tiempo de contacto también es un factor que hemos de tener en cuenta. Los materiales duros tienen un tiempo de contacto menor ya que son más rígidos y se deforman menos. La primera consecuencia es que un sistema así excitado recibe un número de frecuencias mayor y se ponen en marcha resonancias más altas, el sonido generado es más metálico.

Si golpeamos con un material blando el tiempo de contacto es mayor, hay más deformación. Se ponen en marcha con más facilidad las resonancias más graves

(las primeras) y el sonido es más oscuro, menos brillante, más suave. Los macillos de un piano o las baquetas de una marimba están contruidos con diferentes materiales, más o menos duros, dependiendo del carácter que queramos dar al sonido final. En las revisiones que se hacen a un piano se tiene en cuenta esto y en caso de estar apelmazado el fieltro que recubre los macillos se puede ahuecar o cambiar por completo. Si han pasado muchos años y este fieltro está excesivamente compacto el sonido resultante es excesivamente metálico.

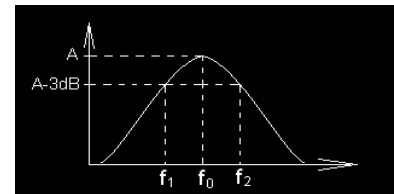


### Caracterización física y perceptiva de las resonancias

Cuando escuchamos un instrumento musical nos llega información sobre muchas de las resonancias que tiene ese instrumento. En las cuerdas se activan casi todas las resonancias: la serie armónica natural. Estas vibraciones pasan a la caja armónica y ponen en marcha las resonancias correspondientes del filtro. Lo que nos llega a nosotros es la suma de todos los armónicos de la cuerda que la caja ha sido capaz de amplificar.

Si aislamos una sola resonancia en un sistema, su frecuencia  $f_0$  será uno de los factores importantes para caracterizar a la resonancia. Tenemos también el concepto de admitancia que viene determinado por la formula:

$$A = \frac{V}{F} = \frac{1}{\sqrt{S_e M_e}} \frac{1}{\sqrt{Q^2 + \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}}$$



Los instrumentos y sistemas en general responden a las vibraciones. En este caso tenemos un máximo en  $f_0$ . Si la frecuencia de la fuerza exterior  $F$  coincide con la frecuencia de resonancia,  $f=f_0$  entonces tenemos para la admitancia el valor máximo:

$$A_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{S_e M_e}} \quad \text{donde} \quad Q=f_0/B \quad ; \quad B=f_2-f_1 \quad \text{Anchura de Banda}$$

La resonancia la tenemos perfectamente definida con los tres valores  $\{f_0, A_{\max}, Q\}$ , está perfectamente especificada tanto en el dominio de la frecuencia como en el del tiempo. Podemos ver como en dos sistemas con la misma anchura de banda  $B$  aquel cuya frecuencia de resonancia sea mayor tendrá mayor factor de calidad.

El factor de calidad  $Q$  nos da una idea de lo que se mantiene el sistema oscilando. Si hay muchas pérdidas de energía el tono se mantiene poco y el factor de calidad es bajo. Si el sistema tiene pocas pérdidas por rozamiento interno o externo el tono se mantiene más tiempo y el factor de calidad es alto. Si  $Q$  es muy alto en una resonancia entonces el sistema dará un tono muy definido y de mayor duración. La cuerda nos da una altura de tono muy definida gracias a la armonicidad (frecuencias de resonancia múltiplos de la fundamental) y decae lentamente: tiene  $Q$  alta. Este factor de calidad también nos da una medida del número de vibraciones que han de transcurrir para que se produzca un determinado decaimiento.

Si la admitancia es grande  $A=V/F$  y la superficie de contacto con el aire de nuestra tabla armónica es grande entonces tendremos mucha sonoridad ya que la velocidad de vibración es grande y esto consigue producir una mayor presión sonora. La velocidad de vibración está directamente relacionada con la presión sonora mediante la formula  $P/V=\rho C$  donde  $P$  es la presión,  $V$  velocidad de las partículas,  $\rho$  densidad del aire y  $C$  velocidad de propagación del sonido en el aire.

En las cuerdas la admitancia es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la tensión y la densidad lineal:

$$A = \frac{V}{F} \propto \frac{1}{\sqrt{T\rho_l}} \quad \text{y la impedancia} \quad Z=1/A$$

de esta fórmula podemos ver que la fuerza suministrada por la cuerda a la tapa es proporcional a la impedancia o al inverso de la admitancia:

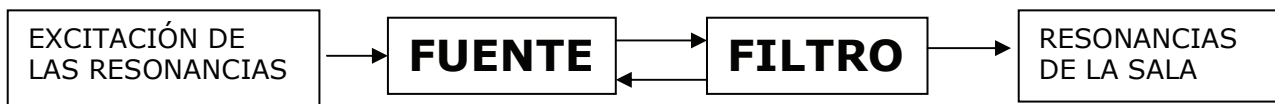
$$Z \propto F \propto \sqrt{T\rho_l}$$

Esta fórmula nos da una pista de lo que supone montar en un instrumento unas cuerdas muy finas: poca densidad y poca tensión para una frecuencia dada, lo que implica poca fuerza suministrada a la caja y por consiguiente poco sonido. Si queremos más sonido habremos de aumentar la densidad lineal de la cuerda, de esta forma aumentará la tensión y también la fuerza suministrada pero habrá que tener cuidado con la tensión excesiva que soporta el instrumento. Existirá una tensión óptima para cada instrumento. Un exceso de tensión puede cargar demasiado el instrumento y puede que no responda bien por lo que tendremos un sonido más pobre.

### Revisión del modelo físico del instrumento musical

Se pueden considerar todo como un conjunto de fenómenos que van a contribuir al sonido final del instrumento o timbre que nosotros percibimos. Aunque el instrumento en realidad sea únicamente la fuente y el filtro también van a contribuir al timbre la forma en la que las resonancias de la fuente son excitadas y contribuirán también a este timbre final del instrumento las características acústicas de la sala.

El gráfico para nuestro instrumento puede quedar de la siguiente forma:

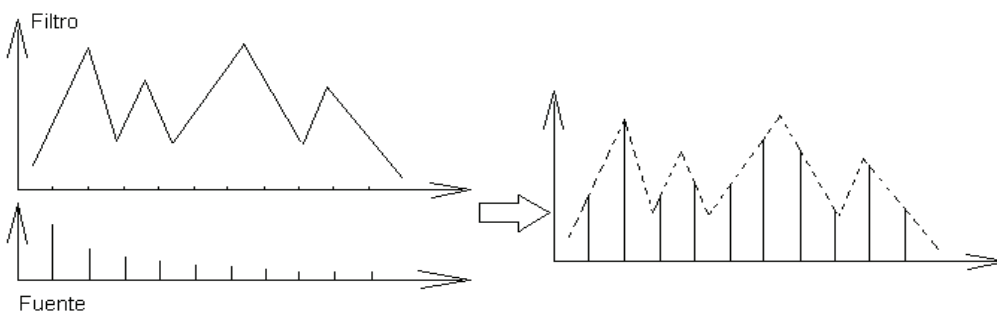


Las salas donde escuchamos los instrumentos también tienen sus resonancias características que marcarán y colorearán el timbre del instrumento o conjunto de instrumentos que escuchemos. No será lo mismo tocar en una sala seca que en una con bastante reverberación.

A una fuente o cuerda le exigimos unas resonancias con un factor de calidad muy alto y con una proporción armónica entre las frecuencias de las resonancias (múltiplos enteros de la fundamental) con lo cual nos aseguramos una altura de tono muy definida. La forma en la que ponemos en marcha estas resonancias potenciará más unos armónicos que otros dependiendo de los materiales y de los lugares donde percutamos o friccionemos la cuerda. Esto marcará también el timbre del instrumento. En el caso de los instrumentos de arco, este último es tan importante como el propio instrumento.

Para el filtro o caja armónica no es necesario que el factor de calidad de las resonancias sea tan elevado. Es bueno que las resonancias tengan cierta anchura de banda B para poder responder a un número considerable de frecuencias que lleguen de la fuente. Es más, si las resonancias del filtro tienen un excesivo factor de calidad pueden aparecer fenómenos extraños como el denominado "lobo" que aparece en violas, cellos y algunos violines y que comentaremos en el siguiente punto.

Estas resonancias del filtro es preferible que estén separadas entre ellas al menos la anchura crítica de banda ACB, así el sonido o timbre obtenido será más transparente y claro.

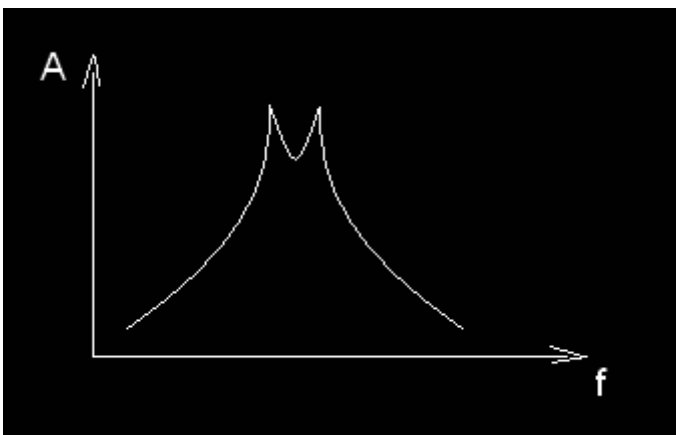


### Acoplamiento de resonancias

En un instrumento se pueden producir acoplamientos entre las resonancias de la fuente y del filtro. Se produce un acoplamiento característico en violas y chelos llamado "lobo". El "lobo" más característico es el que se produce en el cordal del cello. Este cordal tiene una resonancia con una frecuencia que puede coincidir con una de las notas de la cuerda DO. Cuando tocamos esta nota el cordal comienza a vibrar cada vez con más amplitud ya que la resonancia tiene un factor de calidad alto, lo que supone muy pocas pérdidas de energía, cada vez gana más amplitud e interactúa con la cuerda rompiendo la vibración. Esta nota no puede establecerse con normalidad y se escucha un sonido ronco. La solución a este problema suele pasar por añadir una pequeña masa en el cordal de manera que la frecuencia de resonancia se desplace y nos aseguramos así que esa frecuencia o nota no la vamos a dar. En las violas, si una de las resonancias de la tapa tiene un factor de calidad alto y gran admitancia se acopla con la resonancia de la cuerda correspondiente a la nota de la misma frecuencia. La cuerda comienza a vibrar, la vibración pasa a la tapa a través del puente y esta coge mucha velocidad. Este aumento desmesurado de la velocidad hace que la tapa "robe" la energía de la cuerda y la vibración en la misma se rompe. Con el arco podemos suministrar más energía pero el tono no acaba de mantenerse bien y se escucha una especie de ruido ronco que se denomina "lobo".

Estos lobos aparecen generalmente cuando el instrumento tiene una de sus resonancias con un factor de calidad demasiado alto lo que puede hacer que el puente oscile demasiado, con lo cual la cuerda no tiene uno de sus "apoyos" fijos y la altura de tono no puede establecerse bien.

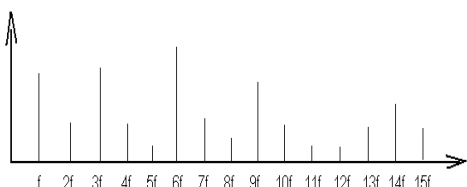
Cierta interacción entre las resonancias cercanas produce batidos que a veces realzan la calidad tímbrica del instrumento. En estos casos las resonancias muy cercanas aparecen como una sola con una cima de doble pico.



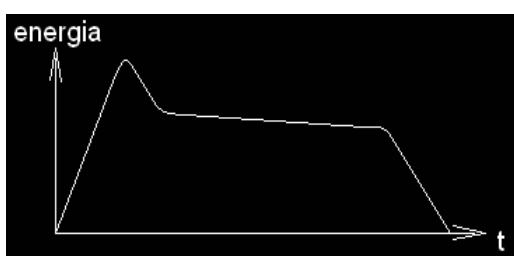
## 8. EL TIMBRE

### Concepto de timbre

Uno de los atributos vivenciales que se le asignan a los sonidos es la altura de tono. La sonoridad es otro atributo que los caracteriza y por último tenemos un tercer atributo: **el timbre, la característica que nos permite diferenciar dos sonidos de igual altura de tono y sonoridad**. Ésta es la definición que se da al timbre en música. Lo que hace que dos sonidos con la misma altura de tono y sonoridad sean diferentes es principalmente la distribución y amplitud de los armónicos de cada uno de los sonidos. Todos estos armónicos acompañan al armónico fundamental. La distribución de los armónicos y sus amplitudes definen en un 70% el timbre de cada instrumento o sonido, el régimen transitorio define el resto. Cada instrumento tiene su timbre característico.



Definir el timbre ha sido siempre una tarea complicada. Con los otros atributos como la frecuencia, asociada a la altura de tono y la sonoridad, asociada a la amplitud de la presión sonora la definición es fácil porque existe una relación suficientemente lineal entre ellas. Si aumenta el atributo físico aumenta el vivencial. En el timbre veremos como la asociación no es tan sencilla y no se adapta a esta norma.



Si le seguimos la pista al sonido que llega a nuestros oídos podemos comprender como, al menos en los instrumentos de cuerda, todo comienza en los modos de vibración de la cuerda. Cuando se excita esta misma cuerda (aquí el arco tiene mucho que decir) se ponen en marcha entre 20 y 40 armónicos o modos de vibración. Todos estos sonidos pasan a través del puente a la caja y ésta los amplifica si tiene alguna resonancia cercana a estos armónicos. Tenemos un sistema multidimensional en el cual

variando uno solo de los armónicos y manteniendo iguales los demás el timbre varia. Las combinaciones posibles son infinitas. El 60-70% de las vivencias tímbricas se pueden explicar mediante esta distribución de armónicos. El régimen transitorio, en otras palabras, la evolución del sonido en el tiempo, como se establece la energía, también será muy importante en esta vivencia y a veces tanto como la distribución de armónicos.

La definición para el timbre de cada uno de los diferentes instrumentos se hace generalmente mediante adjetivos relativos a otros sentidos como la vista, el gusto o el tacto. Esto es probablemente debido a lo extremadamente subjetivo que es el sentido del oído y entre otras cosas carecemos de una cultura verbal referente a él.

Si el sonido que nos llega contiene armónicos solo de baja frecuencia decimos que el timbre del sonido es oscuro o mate.

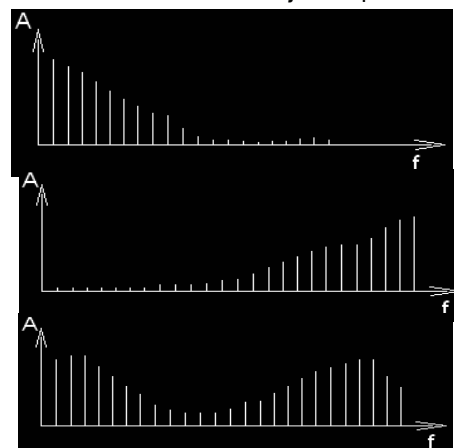
Si contiene armónicos de alta frecuencia y ninguno grave entonces decimos que tiene un timbre chillón, agrio, etc. Los armónicos graves le dan cuerpo a un instrumento, calidez, si faltan el carácter se torna metálico.

Un sonido brillante es aquel que también tiene armónicos de alta frecuencia además de los graves. Si el sonido está equilibrado en todo el espectro de frecuencias decimos que es un sonido redondo.

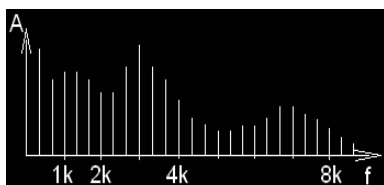
Los sonidos nasales están caracterizados por tener armónicos muy amplios en la zona de frecuencias cercana a 1500-1800 Hz. Los instrumentos que tengan alguna resonancia en esta zona tendrán un timbre nasal.

Un sonido silbante es aquel que tiene un mayor número de armónicos en la zona de 5000 Hz. Los silbidos humanos comienzan alrededor de los 700 Hz y van hasta los 3000 Hz.

Podemos ver el efecto o la contribución de las diferentes frecuencias en una melodía cualquiera interpretada por un violín con un timbre cuyo espectro es completo. Vamos a considerar unas frecuencias de corte de 8k, 4k, 2k y 1 kHz y si disponemos de un ecualizador podemos realizar el experimento y apreciar lo que ocurre cuando filtramos por encima de una frecuencia determinada o quitamos todos los armónicos hasta esa frecuencia en cuestión.



Si quitamos los armónicos por encima de 8 kHz apenas se aprecia cambio alguno pues son armónicos muy altos que casi no se producen o tienen amplitud pequeña en el violín y el oído apenas los nota. Si quitamos todas las frecuencias hasta los 8 kHz apenas se escucha el instrumento. El sonido es un chillido metálico muy bajo en sonoridad en el cual no se puede apreciar la altura de tono. Filtrando los superiores a partir de 4 kHz el instrumento pierde brillo y queda un sonido mate. Si filtramos los inferiores se escucha un silbido chillón y la melodía es poco perceptible. Por encima de los 2 kHz si hacemos un filtrado, los armónicos graves que quedan le dan un carácter muy oscuro al instrumento, sin expresión aunque somos capaces de percibir la altura de tono, la melodía y la sonoridad. Si quitamos los graves hasta 2 kHz el instrumento queda chillón como en las radios antiguas aunque también somos capaces de seguir la melodía. Solo quitamos unos cuantos armónicos, hasta 1kHz y el sonido pierde cuerpo. Quitando todas las frecuencias a partir de 1 kHz, los pocos armónicos que quedan dejan al violín sin vida. Se percibe la altura de tono pero es un sonido tan oscuro que apenas se reconoce el violín. Filtrando los armónicos graves (tan solo dos armónicos) el sonido queda chillón, sin cuerpo.



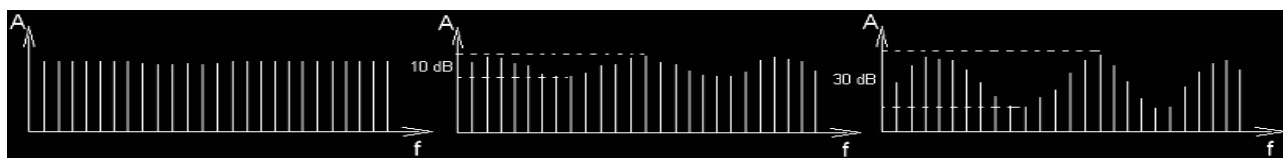
El armónico fundamental de un contrabajo suele ser bastante débil por el escaso tamaño del instrumento, caja de resonancia o filtro con relación a las frecuencias que tiene que dar. Se valora mucho que tenga un gran fundamental así como armónicos altos también -nada fácil de conseguir- que nos ayudan a afinar y a definir la altura de tono. Tampoco podríamos distinguir entre semitonos únicamente con las frecuencias muy graves.

### Sintetización de sonidos

A lo largo de la historia se ha intentado comprender y analizar los diferentes sonidos producidos en la naturaleza y los producidos por los instrumentos musicales. Hoy en día, gracias a la labor de investigación de Helmholtz y de Fourier sabemos que los sonidos constan de diferentes componentes, diferentes modos de vibración, armónicos o parciales. El **análisis** de un sonido consiste en determinar los elementos que lo componen. En su día Helmholtz pudo determinar y diferenciar estos componentes por medio de unos resonadores que "respondían" únicamente si el sonido a estudiar contenía la vibración de frecuencia igual a la frecuencia de resonancia del resonador utilizado. Así, por medio de una colección extensa de resonadores pudo determinar gran parte de los armónicos que componían muchos de los sonidos a estudiar. Hoy en día este trabajo lo podemos realizar por medio de un micrófono y un programa analizador de Fourier.

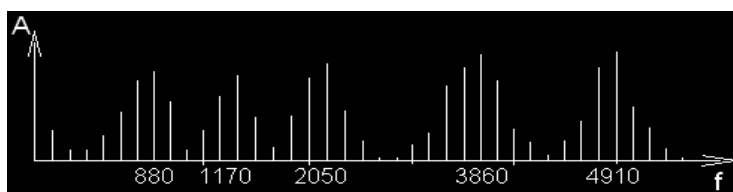
La **síntesis** de un sonido consiste en crear un nuevo sonido basándonos en el análisis hecho anteriormente. Se pueden simular una serie de armónicos o parciales por medio de circuitos eléctricos, enviarlos a un altavoz y recrear así el sonido de algún instrumento estudiado. Esta tarea la realiza el sintetizador. Como veremos, la labor no es sencilla porque a parte del espectro de frecuencias también influye en el timbre el transitorio del sonido, esto es, cómo se establece la energía de todos los armónicos que componen el sonido y cómo desaparece esa energía. Con la llegada de los ordenadores esta tarea se ha extendido y se ha simplificado mucho la labor de los "creadores" de sonidos. Los sintetizadores crean de forma artificial sonidos parecidos a los ya existentes o nuevos sonidos desconocidos para el cerebro humano. Existen tantos matices y variables que la tarea no es sencilla pero sí muy creativa.

Las primeras experiencias que se hicieron consistían en fabricar filtros electrónicos simulando resonancias en los que se amplifican por igual todos los armónicos en unos casos o se amplificaban algunos más que otros y a diferentes frecuencias.

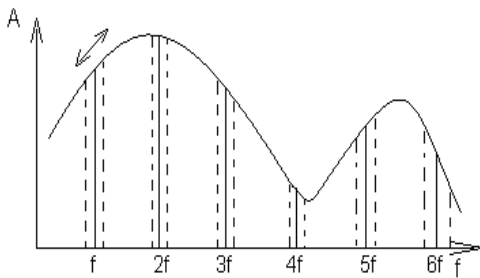


Un instrumento de cuerda puede sonar como algo intermedio entre los dos últimos casos. Un violín electrónico se construye mediante un banco de filtros que recibe la señal de las cuerdas gracias a unos cristales de cuarzo piezoeléctricos colocados en el puente los cuales convierten la señal de presión variable en una diferencia de potencial. Un buen violín ha de tener diferencias en la amplificación de los diferentes armónicos, la caja de resonancia ha de filtrar algunos armónicos para que no se produzcan fricciones en el sonido y nos parezca claro y limpio.

- 1º 880 Hz - 560 Hz
- 2º 1170 Hz - 970 Hz
- 3º 2050 Hz - 2350 Hz
- 4º 3860 Hz - 2680 Hz
- 5º 4910 Hz - 2910 Hz



Podemos mover los máximos de resonancia de este violín electrónico. En el primer caso variamos la frecuencia de la resonancia de 880 a 560 Hz y cambia el carácter de vocal (como veremos mas adelante) de "e" cerrada a "e" abierta. En el segundo caso de "e" cerrada a "a", en el tercero se hace brillante la "e". En el 4º y 5º casos se gana mucho en brillantez bajando el máximo de esta última zona de armónicos, este fenómeno lo aplicaremos a las resonancias del puente. Si variamos por encima de los 2 kHz no cambia el timbre vocálico, lo que hacemos es cambiar la brillantez del instrumento.



Otro aspecto que influye en el timbre es el **vibrato**, que se ejecuta con mayor o menor dificultad y con diferentes técnicas en casi todos los instrumentos. El vibrato le da vida y mucha expresividad a la melodía. Técnicamente se produce una modulación en frecuencia aunque en algunos instrumentos es más fácil hacer una modulación en amplitud. La vivencia de la altura de tono puede quedar mejor definida con un vibrato óptimo que se da más o menos con unas 6 oscilaciones por segundo y una modulación en frecuencia de un cuarto de tono, aproximadamente un 3%.

Como consecuencia del vibrato se produce también una modulación en amplitud en los diferentes armónicos ya que los armónicos superiores se desplazan en la medida en que lo hace el fundamental. Estas variaciones de tono y sonoridad hacen que se realce la riqueza tímbrica y la expresividad, conseguimos más información sobre el instrumento y el timbre que nos llega del mismo se enriquece.

Las investigaciones hechas por ciertas personas sacaron a la luz diferentes fenómenos relacionados con el timbre. Un hecho determinante para la vivencia del timbre es la aparición de los armónicos o parciales. En la trompeta por ejemplo los parciales superiores se inician o aparecen más tarde que los graves y se atenúan antes. Se han sintetizado sonidos semejantes a los de la trompeta teniendo en cuenta estas variaciones y se consiguen "crear" a veces sonidos electrónicos imposibles de diferenciar de los reales.

### La voz, los formantes y el timbre

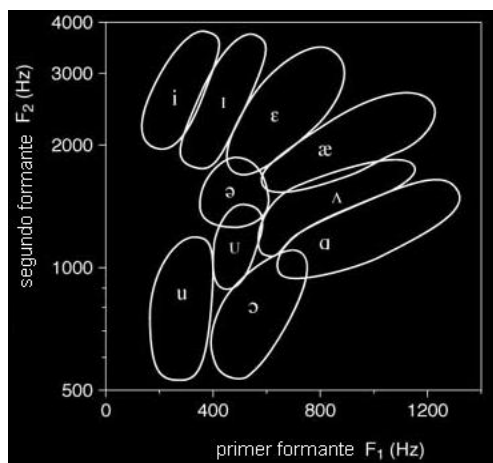
La voz humana puede considerarse como el primer instrumento musical utilizado por nuestros antepasados. La capacidad que tenemos de modular la sonoridad de nuestra voz y la altura de tono de forma continua, así como de variar el timbre propio de cada voz y la infinidad de voces diferentes hace de esta herramienta un instrumento que cubre un espectro muy amplio de posibilidades. En este apartado estudiaremos la relación que existe entre la voz y el timbre.

El sistema o aparato fonador consta de una fuente: las cuerdas vocales, dos membranas que se abren y se cierran para permitir el paso del aire que respiramos y para producir sonidos con una altura de tono definida gracias al efecto Bernoulli. Como cualquier otro instrumento musical tiene un filtro: laringe y cavidades bucal y nasal que se encargan de modular los armónicos que le llegan de la fuente, las cuerdas vocales. A diferencia de otros instrumentos de viento la voz es un sistema no realimentado en el que las frecuencias de resonancia de la fuente, más bajas que las del filtro, no se ven alteradas por la columna de aire contigua. Las cuerdas vocales nos dan la altura de tono. Funcionan de esta manera también el acordeón y la armónica. En clarinetes, trompetas y demás sistemas realimentados las frecuencias de resonancia de la fuente (caña o labios) son más altas que las de la columna contigua por lo que caña y labios se acoplan y vibran a la misma frecuencia que las resonancias que se producen en el tubo o columna de aire, que es quien define la altura de tono.

El asunto que más nos interesa en este apartado es la relación que existe entre las vocales y el timbre. Las consonantes se dividen en dos grupos, uno de ellos se puede considerar como mantenidas o estacionarias: F, X, S, Z, mientras que en el otro grupo de consonantes tenemos tan solo un transitorio, como una pequeña explosión que acompaña a cada vocal: P, K, B, L, etc. Las vocales tienen un estacionario muy definido y son más fáciles de estudiar. En el idioma castellano, como en euskera, japonés, griego y tantos otros idiomas tenemos tan solo cinco vocales pero existen en total entre los diferentes idiomas del mundo unas 23 vocales y la diferencia que existe entre ellas es la misma que puede existir entre dos instrumentos parecidos: una cuestión de timbre.

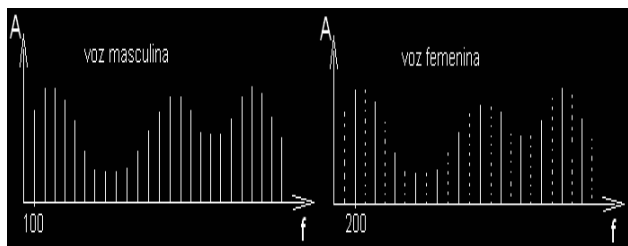
El aparato fonador, como cualquier otro sistema mecánico, tiene sus propias resonancias. En el caso de la voz humana las resonancias se denominan **formantes**. La laringe tiene una longitud y una anchura determinada. Después tenemos la cavidad bucal y la nasal con unas formas establecidas para cada fisonomía. Además de esto tenemos unas partes móviles sobre las cuales actuamos y son éstas las que nos dan la posibilidad de modificar la forma de todo el aparato fonador y "mover" las resonancias o formantes encargados de modular los armónicos que llegan de la fuente. Desplazando estos formantes lo que conseguimos es un abanico muy amplio de timbres diferentes: las diferentes vocales.





Tenemos dos componentes básicos que son en gran medida los que dan el carácter a cada vocal. Por una parte **los labios** son los encargados de modificar el primero de los formantes y actúan como la abertura del resonador de Helmholtz, bajando la frecuencia de resonancia de la cavidad bucal en la medida en que se cierran los labios. El segundo de los formantes que caracterizan a las vocales se altera por medio de **la lengua**. Ésta se encarga de modificar el volumen interno de la boca y en consecuencia se desplaza en un sentido u otro la frecuencia de este segundo formante. Podemos ir de la U a la A sin más que abrir los labios –modificamos el 1er formante- y podemos ir de la U castellana a la I francesa tan solo adelantando la lengua para cerrar la cavidad bucal, modificando así el 2º formante. Actuando sobre el paladar anterior podemos variar algún formante más y alterar el timbre de la voz.

Las combinaciones posibles son infinitas pero solo serán posibles las vocales próximas cuyas pequeñas diferencias sean apreciables. Las cinco vocales más típicas están en los extremos, bastante separadas entre sí, como es lógico. La definición de las vocales se produce en los primeros 2 kHz. Por debajo de esta frecuencia un pequeño cambio en los formantes y el carácter de la vocal queda alterado. En voces humanas, si filtramos los superiores a 2 kHz no podemos distinguir entre la voz de un deprimido y la de un histérico. Los armónicos superiores a 2 kHz le dan expresividad y brillantez a la voz y a cualquier instrumento musical también. Si bajamos la amplitud del fundamental una cantidad considerable (9 dB) entonces la voz pierde cuerpo y se hace chillona, pierde calidez.



Las voces de los cantantes de ópera se modelan de manera que los formantes de frecuencia más altos se junten alrededor de los 3 kHz para que su voz destaque, al igual que los violines solistas, frente a la orquesta. Desde el punto de vista acústico la voz femenina se diferencia de la masculina en general por la distribución de sus armónicos. Ambas voces tienen tres formantes generales pero el número de parciales cambia.

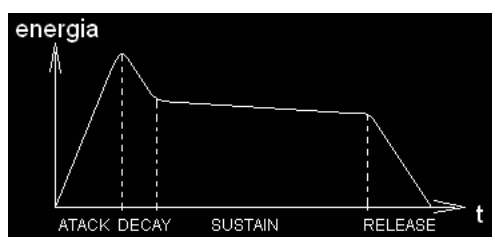
Las voces femeninas tienen un fundamental más agudo, más alto en frecuencia, una 8ª más o menos, y en consecuencia aparecen menos armónicos superiores para cubrir el espectro de formantes que se encargan de definir las vocales y de darle brillo a la voz. Son voces más claras ya que estos parciales están más espaciados pero es más complicado definir las vocales en la voz femenina, más aún cuando se cantan notas en tesituras altas.

Tenemos tres formantes principales, de los cuales el tercero suele ser una aglutinación de unos cuantos que están por la zona cercana a 3 kHz. Para dar más proyección a la voz las y los cantantes de ópera se buscan la vida modificando las vocales para cambiar alguno de los formantes de manera que puedan amplificar algún que otro armónico.

Cada vocal tiene sus formantes específicos. Ciertas vocales cantadas le dan más brillantez a la voz humana y le dan cuerpo también. La más brillante y con más cuerpo de las vocales es la "e". El timbre de los buenos instrumentos recuerda un poco este carácter vocálico de "e" aunque podemos considerar la "a" también como una vocal potente ya que tiene los dos formantes situados o unificados en unos 1000 Hz, con lo cual tenemos más amplitud.

### Régimen transitorio

El sonido no se establece instantáneamente. Partiendo del silencio, cada nota musical tarda un tiempo en estabilizarse y en aparecer. Este periodo de tiempo es lo que denominamos transitorio. Una vez que el sonido se establece tenemos el régimen estacionario. Pasamos de una situación de silencio a otra en la que una cantidad de energía se ha establecido. El tiempo que tarda esta energía en establecerse influye en el timbre que percibimos de ese instrumento.



Se puede ver como variando los tiempos del régimen transitorio se altera el timbre de manera considerable. Con un tiempo de establecimiento del volumen sonoro final de unos 25 ms se siente como un golpe, la altura de tono se desfigura. Con un tiempo de establecimiento de unos 400 ms se consigue una buena altura de tono. En una orquesta conviene que no sean muy precisos y que las entradas no las hagan todos a la vez sincronizados

puesto que escucharíamos -y así ocurre- como un golpe explosivo. Las entradas consecutivas de los músicos suavizan el ataque.

El sonido que escuchamos como nota musical tiene unas cuantas fases y todas van a influir en la vivencia del timbre. Tenemos un transitorio de ataque inicial **-atack-** que hemos visto ya, un decaimiento inicial **-decay-** antes del estacionario **-sustain-** y un decaimiento final **-release-**.

Cada instrumento tiene diferentes características y transitorios de ataque dependiendo del modo en el que las resonancias de la fuente son excitadas (cuerda pulsada, golpeada, dureza de los materiales, tipo de caña, labios, etc.).

El transitorio de ataque de un piano es muy corto, la señal se establece en poco más de 10 ms y tiene un decaimiento continuo gracias al macillo de fieltro que apaga la señal después de un tiempo pequeño. El violín tiene un transitorio mayor, después un estacionario que puede mantenerse tanto como el músico quiera y un decaimiento final muy rápido.

#### Transitorios de ataque

Piano	10-20 ms	Clarinete	50-70 ms	Violín	60 ms
Trompeta	20 ms	Flauta	100 ms	Saxofón	40-50 ms

Una voz se puede sintetizar electrónicamente. Para esto hay que controlar bien el transitorio. Si el salto de tono a tono se hace perfecto suena muy mal, suena a instrumento electrónico. Si hacemos un salto progresivo y lento también suena mal pero si se hacen saltos en los que varíe el 75% de la energía en 70 ms entonces parece una voz humana.

En pasajes y melodías muy rápidas las notas tienen una duración muy corta. Es en estos casos en los que el transitorio es determinante en la percepción que tenemos del timbre. Si variamos el transitorio de ataque de una flauta y lo disminuimos nos puede llegar a parecer una trompeta si se interpreta una melodía muy rápida.

Si a un sonido grabado le quitamos por completo el transitorio de ataque, la energía se establece inmediatamente, y si generamos electrónicamente el resultado la sensación que nos produce la escucha de estos sonidos es que se trata de un instrumento de percusión. Si la duración de las notas es muy corta la determinación de la altura de tono es imposible.

Junto a los sonidos aparece una componente de ruido que puede influir en el aspecto tímbrico. Los pequeños ruidos se escuchan si la sala es pequeña o nos situamos cerca del instrumento. El ataque también influye: llega directo a nuestros oídos en un intervalo de tiempo muy pequeño y no se generan reverberaciones. El sonido estacionario, al contrario, interacciona con las resonancias de la sala y el timbre puede modificarse. El instrumentista también puede actuar sobre el instrumento y cambiar el timbre. Los instrumentistas de viento bien saben la importancia que tiene una buena colocación postural de la cabeza, garganta, etc. para obtener un buen sonido, que es lo mismo que decir un buen timbre.

#### Espacio de timbres

Los trabajos hechos por Risset, Plomp, Grey y otros más trataron de definir este espacio de timbres inmenso que conocemos. Cada sonido que escuchamos puede considerarse como un objeto. Vamos a considerar únicamente los instrumentos musicales. Dos instrumentos semejantes pueden tener timbres diferentes ya que una pequeña modificación de la geometría o del material puede cambiar las resonancias y los armónicos quedan amplificadas de diferente manera. El espacio de timbres es multidimensional.

Se pidió a músicos y expertos que estimaran la similitud de pares de sonidos musicales para clasificarlos en un espacio de tres dimensiones teniendo en cuenta que se puede describir mediante tres características o variables importantes que influyen en el timbre:

- (I) En uno de los ejes se puede ver como varía la distribución de la energía espectral o distribución de los parciales con sus correspondientes amplitudes.
- (II) La segunda dimensión o eje puede depender de como aparecen en el tiempo los diferentes parciales.
- (III) Este eje se puede relacionar con el transitorio de ataque del sonido.

Los instrumentos se pueden agrupar en tres familias cada una de las cuales puede contener unas cuantas subfamilias. El timbre de los instrumentos puede variar con la presión. Suena diferente un saxofón tocado muy suave o tocado fuerte. Así se puede crear un espacio tridimensional en el que se sitúan todos estos objetos sonoros o timbres diferentes.

## 9. MOVIMIENTO ONDULATORIO

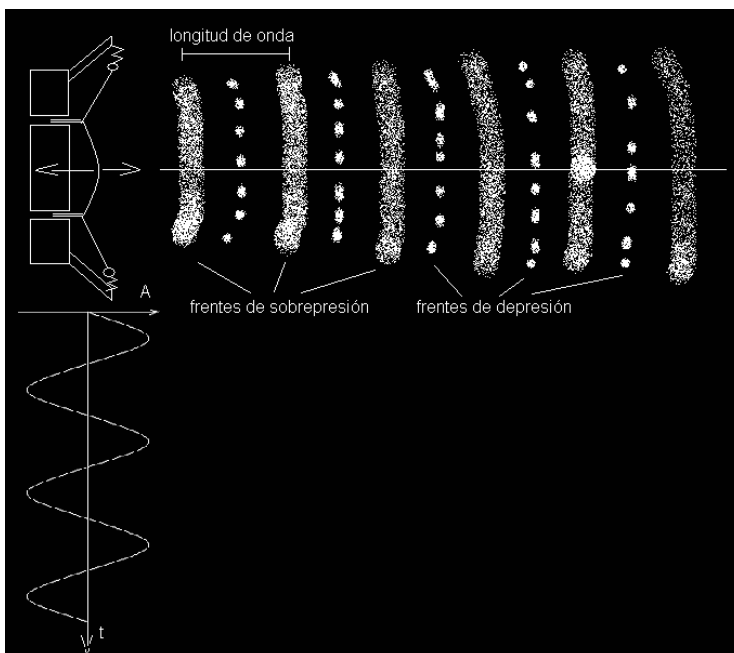
En este tema veremos características generales de las ondas y algunos fenómenos que ocurren cuando éstas se encuentran con diferentes medios y obstáculos.

Como hemos visto, el sonido es una onda mecánica, una vibración que necesita de una materia elástica o medio mecánico para propagarse. Necesitamos, por lo tanto, un medio en equilibrio –el aire- con cierta rigidez y cierta elasticidad. La onda mecánica o sonido es una perturbación -una variación de presión- producida en el aire que se propaga a través de él desde el instrumento musical hasta nuestro oído.

### Ondas transversales y ondas longitudinales

Las **ondas transversales** son aquellas en las que la dirección de la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Una ola de mar es una perturbación que se propaga hacia la costa mientras que el movimiento que soportaríamos nosotros en el agua es ascendente y descendente, perpendicular o transversal a la dirección de propagación. En una cuerda se produce el mismo fenómeno. La propagación de una perturbación, pulsando por ejemplo la cuerda, se produce a lo largo de la cuerda mientras que la perturbación (la pulsación) tiene una dirección transversal a la cuerda. En la tabla de resonancia de los pianos, las tapas de un violín, etc., las ondas son transversales también.

Las **ondas longitudinales** se comportan de manera diferente. En estas ondas la propagación y la perturbación tienen la misma dirección. Podemos imaginar el ejemplo de las piezas de domino cercanas y unidas mediante muelles a una base. Si golpeamos la primera de las piezas hacia su vecina la primera de las fichas le comunicará el impulso a la segunda y acto seguido retrocederá. La segunda pieza choca con la tercera etc. La última de las piezas recibirá un impulso parecido al que se ejerció sobre la primera. El sonido se propaga de esta forma y podemos ver en este tipo de ondas que la perturbación y la propagación tienen la misma dirección. Son ondas longitudinales.



En estas ondas la materia -en promedio- no se traslada. La perturbación o sonido se propaga a través del medio en el cual cada partícula oscila alrededor de un punto y transmite el movimiento a su vecindad. De esta manera el sonido producido en el altavoz se transmite hasta nosotros.

Estas ondas quedan determinadas por tres variables que son: su **amplitud A**, la **velocidad de propagación en el medio C** – en nuestro caso, el aire se propaga a 340 m/s aprox.- y la **longitud de onda lambda**, que se define como la distancia que existe entre dos puntos homólogos de la onda: dos frentes de sobrepresión, dos puntos de máxima amplitud, etc. El **periodo T** se define como el tiempo que tarda la onda en recorrer un ciclo completo.

La **frecuencia f** es el número de ciclos que realiza la onda por unidad de tiempo.

Si conocemos la velocidad de propagación y la longitud de onda entonces la frecuencia queda determinada por la fórmula:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad , \quad C = \lambda f \quad \text{y de aquí} \quad f = \frac{C}{\lambda}$$

La longitud de onda  $\lambda$  es la distancia recorrida por la onda en un periodo o lo que es lo mismo: la distancia entre dos frentes de sobrepresión o de depresión. Esta distancia, en el caso del sonido, puede oscilar entre 21 m y 1,7 cm.

### Propagación del sonido en el aire

La velocidad de propagación del sonido en el aire depende, entre otras cosas, de la temperatura del mismo y viene dada por la fórmula:

$$C = C_0 \sqrt{\frac{273+t}{273}} \quad C_0=331.4 \text{ m/seg}$$

donde  $t$  es la temperatura en grados centígrados y  $C_0$  es la velocidad de propagación del sonido en el aire a una temperatura de 0 grados centígrados (273 Kelvin).

$$\text{A } 20 \text{ C}^\circ \text{ la velocidad de propagación viene dada por } C = 331.4 \sqrt{\frac{273+20}{273}} = 343.42 \text{ m/s}$$

Podemos calcular ahora las longitudes de onda de los dos sonidos extremos del espectro en el aire a 20 C° que son 16 y 20000 Hz:

$$\lambda (16\text{Hz})=343.32/16= 21.45 \text{ m} ; \lambda(20000\text{Hz})=343.32/20000= 0.017 \text{ m} = 17 \text{ mm}$$

En cualquier otro medio la velocidad de propagación es diferente y también lo será la longitud de onda.

### Perturbación de las ondas por objetos

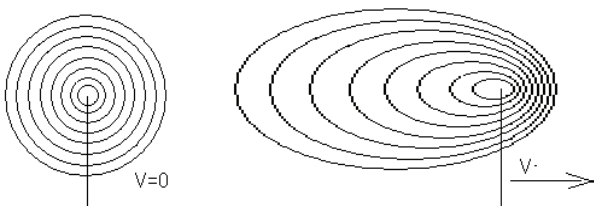
Acabamos de ver como las longitudes de onda de los sonidos que podemos oír varían de unos 20 milímetros a unos 20 metros. Estas ondas son perturbadas por objetos que tienen un tamaño considerable comparado con la longitud de onda. Una persona es un objeto insignificante para una onda de sonido de 16 Hz ( $\lambda=20$  m) pero un edificio es lo suficientemente grande como para perturbar y poder cambiar la dirección de propagación de esta onda. Nuestro cuerpo, nuestra cabeza y nuestras orejas van a perturbar las ondas a partir de cierta frecuencia. Para calcular esto consideramos el tamaño de un objeto de radio  $a$ . Los objetos que cumplan  $\lambda \leq 6a$  serán capaces de perturbar las ondas consideradas.

Si tenemos en cuenta nuestra oreja, con un radio aproximado  $a=0.02$  m (2 cm) podemos calcular a partir de qué frecuencia será perturbada por la oreja haciendo el cálculo  $6a=6 \times 0.02=0.12$  m, ésta es la longitud de onda más grande que es capaz de perturbar nuestra oreja, por tanto será capaz de perturbar todas aquellas ondas que tengan una longitud de onda menor: una frecuencia mayor. Esta  $\lambda$  corresponde a una onda de frecuencia  $f=C/\lambda$  que en número resulta ser  $f=340/0.12=2833$  Hz. Las ondas de  $\lambda$  menor tendrán mayor frecuencia y nuestra oreja será capaz de perturbar las ondas de frecuencias a partir de 2833 Hz.

Los sonidos de frecuencia alta que llegan al oído se reflejan en los entramados de la oreja y entran al conducto auditivo de manera diferente dependiendo de cómo situemos la cabeza, con lo cual podemos saber la dirección de la cual nos llega el sonido, en cambio, las ondas de baja frecuencia o longitud de onda grande, no son perturbadas por la oreja y no podemos saber de qué dirección nos llegan. Nuestro cerebro es capaz de saber de donde llegan las ondas calculando las diferentes amplitudes que llegan a cada oído y el desfase entre ellos.

### Efecto Doppler

En una fuente sonora en reposo las ondas evolucionan simétricamente en todas las direcciones, en forma esférica, pero si la fuente está en movimiento, o si nosotros nos acercamos hacia la fuente, entonces en la dirección del movimiento relativo se produce una compresión de los frentes de onda o frentes de presión, con lo cual percibimos un sonido con longitud de onda menor que el de la fuente en reposo, consecuentemente percibiremos un sonido de mayor frecuencia:



mayor altura de tono. Si la fuente se aleja de nosotros percibiremos una altura de tono menor. A medida que la fuente genera las sobrepresiones y depresiones el desplazamiento de la fuente hace que la distancia entre los frentes disminuya en el sentido del movimiento y aumente en el sentido contrario al movimiento.

La vivencia que tenemos cuando la fuente se acerca con velocidad  $v$  hacia nosotros es la de una señal con una altura de tono mayor  $f'$  que la emitida por la fuente  $f$  y cuando la fuente se aleja de nosotros percibimos una altura de tono  $f''$  más baja que la emitida por la fuente.

$$f' = f \frac{C}{C - V} \quad \text{acercamiento relativo}$$

$$f'' = f \frac{C}{C + V} \quad \text{alejamiento relativo}$$

Si observamos y analizamos las fórmulas anteriores podemos ver lo que ocurre cuando la velocidad de un avión se acerca a la velocidad del sonido  $C=340$  m/s = 1224 km/h.  $V$  es la velocidad del avión que en nuestro caso será igual a la velocidad de propagación de las ondas de sonido en el aire  $f' = f \frac{C}{C - V} = \infty$ . Una frecuencia infinita correspondería a una longitud de onda igual a cero. La fuente emite los frentes de presión y se mueve a la misma velocidad a la cual se propagan estos mismos frentes, lo que se traduce en una compresión inmensa que es percibida como una explosión por las personas que se encuentran en las cercanías de la trayectoria de este avión.

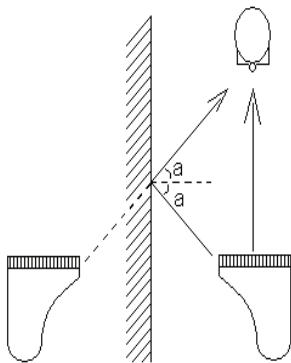
### Reflexión, Refracción, Absorción (coeficiente de absorción), Dispersión, Difracción y Difusión

En este apartado vamos a ver lo que ocurre cuando las ondas que estamos estudiando se encuentran con un medio diferente. Dependiendo de cómo sea este nuevo medio el efecto predominante será uno u otro.

En términos generales se van a dar siempre dos casos. Cuando una onda se encuentra un nuevo medio parte de la onda se reflejará y parte se absorberá.

La impedancia de un medio –la dificultad para moverlo– se define como el producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación del sonido en ese medio,  $Z = \rho C$ , en el caso del aire la impedancia tiene un valor muy bajo y la admitancia un valor muy alto (la impedancia es el inverso de la admitancia) lo cual quiere decir que es un medio muy fácil de mover. Cuando una onda se encuentra con otro medio de impedancia diferente se producirá una **reflexión**.

Suponemos un medio liso y plano. La onda reflejada y la onda incidente mantienen el mismo ángulo con la normal o perpendicular a la superficie y la reflexión se produce en un plano perpendicular a la superficie.



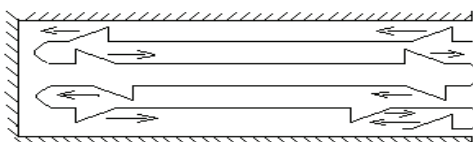
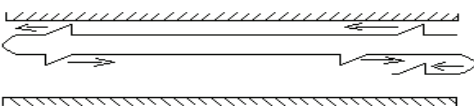
Con el sonido se produce el mismo efecto que con la luz en un espejo. Nosotros escuchamos primero el sonido directo y un poco más tarde el reflejado. Tendremos la impresión de oír otra fuente diferente que llega del otro lado del “espejo de sonido”.

Los diseños de las salas se hacen con unos patrones determinados de manera que se puedan optimizar y aprovechar bien todas las reflexiones. Se potenciarán las que mejoran la calidad de la audición y se evitarán aquellas que deterioran una buena escucha de la obra interpretada.

Cuando pasamos de un medio de menor impedancia a uno de mayor impedancia (el caso de una onda de sonido que viaja a través del aire y se encuentra con una pared) no se produce cambio de fase: las compresiones se reflejan como compresiones y las depresiones se reflejan como depresiones. Si la onda pasa de un medio de mayor impedancia a otro de menor impedancia (es el caso de una onda que viaja dentro de un tubo y se encuentra con el final abierto: el aire del exterior del tubo tiene menor impedancia que el del interior) entonces si que cambia de fase la onda, las compresiones se reflejan como depresiones y las depresiones como compresiones.

$$\text{TUBO ABIERTO-ABIERTO: } f = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{2L}$$

$$\text{TUBO CERRADO-ABIERTO: } f = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{4L}$$



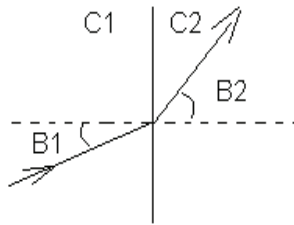
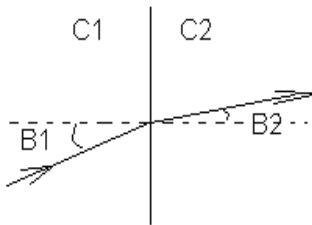
La longitud de onda es la distancia recorrida por la onda hasta encontrarse en el mismo lugar y con la misma fase.

Las diferentes reflexiones que sufre la onda en cada tubo nos dan, en el caso del tubo Abierto-Abierto, una longitud de onda de dos veces la longitud del tubo y en el Cerrado-Abierto de cuatro veces la longitud del tubo.

La **refracción** se produce cuando la dirección de propagación de la onda cambia de un medio a otro. Si la onda pasa de un medio con velocidad de propagación  $C_1$  a otro con velocidad de propagación  $C_2$  entonces el ángulo de incidencia es diferente al ángulo de la onda transmitida.

$\text{Sen}\beta_2 < \text{Sen}\beta_1$  si  $C_2 < C_1$

$\text{Sen}\beta_2 > \text{Sen}\beta_1$  si  $C_2 > C_1$



Si la diferencia de las velocidades de propagación es muy grande y pasamos de un medio  $C_1 \ll C_2$ , como es el caso del paso del aire a un material de construcción típico de salas, en este caso existe un ángulo a partir del cual toda la onda se refleja y no pasa nada de sonido al otro medio. En las salas alargadas ocurre este fenómeno.

El concepto de **absorción** es fácil de intuir. La onda de presión sonora llega a un nuevo medio. Parte de la onda se refleja y parte se transmite. La absorción es la cantidad de sonido que el nuevo medio deja pasar y no refleja. Mandamos una onda incidente perpendicular a una superficie y calculamos que cantidad de esta onda se refleja. Si la cantidad de energía que se refleja es la misma que la energía incidente entonces el material es totalmente reflectante y si la energía que se refleja es nula el material es totalmente absorbente.

Podemos calcular el valor de estas cantidades reflejadas y transmitidas, respecto de la intensidad incidente, conociendo la impedancia de cada medio:  $Z_1 = \rho_1 C_1$  y  $Z_2 = \rho_2 C_2$

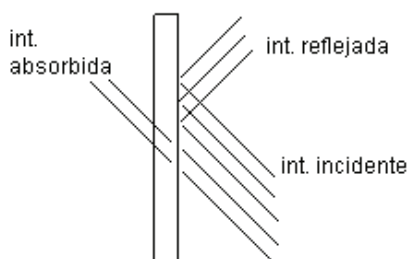
$$\frac{I_{\text{transmitida}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad ; \quad \frac{I_{\text{reflejada}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Cuando los dos medios tienen una impedancia muy parecida casi toda la onda se transmite y muy poca cantidad de energía se refleja. Éste es el caso de la onda dentro de un tubo y su paso al exterior al tubo: muy poca energía se refleja y se queda en el tubo, casi toda la energía sale al exterior, es por esto por lo que escuchamos los instrumentos de viento. Si la impedancia de los dos medios es muy diferente, el caso del aire y una pared de hormigón (un valor muy alto de la impedancia) entonces casi toda la energía de la onda se refleja y no se transmite casi nada al otro medio. Este material será muy reflectante.

Tenemos que tener en cuenta también la porosidad del material. No podemos olvidar que el sonido se transmite a través del movimiento o vibración de las partículas y moléculas del aire y un material muy poroso puede ser una trampa para estas moléculas que pierden en las cavidades del material la energía y la capacidad de transmitir la señal. Este fenómeno se utiliza en algunos materiales para que sean más absorbentes. En términos generales los materiales blandos y porosos son buenos absorbentes y los materiales duros y lisos buenos reflectantes. Podemos imaginar el efecto que tiene un material sobre el sonido comparando, burdamente, la situación con la de una pelota de goma que rebota contra ese material: el rebote contra una pared de hormigón y el rebote contra unas cortinas plisadas de tela muy blanda y pesada.

El **coeficiente de absorción  $\alpha$**  (alfa) es un valor que se adjudica a los diferentes materiales en función de la capacidad que tienen para reflejar o absorber el sonido.

Supongamos una onda  $I_i$  que llega a una pared desde todas las direcciones posibles. Esta pared absorbe una cantidad de energía acústica  $I_a$  y la cantidad de energía reflejada será  $I_r$ . Toda la energía absorbida puede que se transmita a otro medio o que se pierda por fricciones y amortiguaciones dentro del material.



Mandamos una intensidad incidente a la superficie y medimos la intensidad que se refleja. La diferencia entre lo que enviamos y lo que nos llega es lo que absorbe el material:

$$I_i = I_r + I_a \quad ; \quad I_a = I_i - I_r$$

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} = \frac{(I_i - I_r)}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i}$$

Este coeficiente de absorción  $\alpha$  toma valores entre cero y uno. Un material que no refleje nada de sonido tiene un coeficiente de absorción  $\alpha=1$  y el material que sea capaz de reflejar todo el sonido que le llega tendrá  $\alpha=0$ .

Generalmente los materiales absorben menos los sonidos de baja frecuencia. La madera por el contrario absorbe más los graves y refleja más los agudos, esto hace que las salas construidas con madera sean más brillantes. A la hora de hacer valoraciones hay que ver qué es lo que pasa con el material en todo el rango de frecuencias. Un material tiene, en general, diferente coeficiente de absorción para cada frecuencia. Una ventana abierta tiene un coeficiente  $\alpha=1$  y el cemento liso entre  $\alpha=0.03$  (agudos) y  $\alpha=0.01$  (graves).

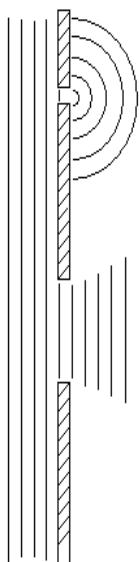
Cuanto más blando sea el material, más poroso y tenga menos capacidad para vibrar (muy poco elástico o muy plástico) como los paneles piramidales de fieltro más absorbente será a las diferentes frecuencias.

La **dispersión** ocurre cuando en un medio tenemos diferentes velocidades de propagación para las diferentes frecuencias. En el aire todas las frecuencias viajan a la misma velocidad, no es un medio dispersivo, si lo fuera, oíríamos en diferentes tiempos los graves y los agudos.

El ejemplo más conocido es el arco iris producido por la dispersión de los diferentes colores en las gotas de agua. Este fenómeno también se produce en un prisma: las diferentes frecuencias o colores viajan a diferente velocidad dentro del material del prisma lo que hace que se produzca una refracción con diferente ángulo para cada color y vemos así separados todos los colores que componen la luz blanca.

Las ondas longitudinales no son dispersivas en ningún medio pero las transversales si lo son. Las frecuencias agudas viajan en las tablas armónicas a mayor velocidad que las graves. Éste si es un medio dispersivo. La velocidad de propagación de un sonido es proporcional a la raíz cuadrada de su frecuencia por lo que los sonidos de mayor frecuencia tienen mayor velocidad de propagación. Las cuerdas no son dispersivas.

La **difracción** se produce cuando la onda se encuentra con un objeto, una pared, una puerta, etc. Podemos imaginar un frente de ondas plano que llega a un panel sólido totalmente reflectante para asegurar que nada de la onda lo atraviesa. La difracción se produce cuando la onda pasa por una abertura. Este fenómeno se puede explicar por el principio de Huygens que nos dice que cada punto del espacio o de materia al que llega la onda se comporta como una nueva fuente puntual.

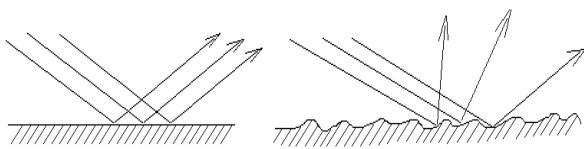


Si no existe ningún obstáculo todos los puntos o nuevas fuentes se recomponen y forman un nuevo frente de ondas plano pero si la onda llega a un panel, abertura, etc. cada nuevo punto se convierte en una nueva fuente que emite en todas las direcciones y el sonido, o la onda, será capaz de rodear al obstáculo y propagarse más allá de su dirección original de propagación. Este fenómeno depende de la relación entre la longitud de onda y la abertura. Consideramos  $a$  el radio de la abertura, si  $6a < \lambda$  entonces se cumple este principio y la abertura se comporta como una fuente radiando en todas direcciones, esto viene a ser el caso en el que la abertura es bastante más pequeña que la longitud de onda. Si  $2a = \lambda$  la onda atraviesa la abertura generando “una sombra” y propagándose casi en la misma dirección, es el caso de una abertura muy grande respecto de la longitud de onda.

Se puede entender así como las ondas graves son capaces de rodear cualquier obstáculo (llegan a todas partes) gracias a la gran longitud de onda y a medida que aumenta la frecuencia la direccionalidad ante una abertura se mantiene y el efecto de difracción es menos acusado. Los altavoces de agudos son muy direccionales.

Vamos a ver ahora en que circunstancias se produce la **difusión** que se puede definir como una reflexión caótica sobre una superficie que no es lisa comparada con la longitud de la onda que llega. Este fenómeno es muy importante para el tratamiento y la adecuación acústica de las salas.

Una reflexión sobre una superficie lisa nos puede producir una “imagen” sonora de la fuente, pero si la superficie es rugosa entonces se producen reflexiones caóticas en todas direcciones, la onda se rompe, y no se produce la imagen sonora. Lo más importante a destacar de este fenómeno es que la energía sonora no se absorbe, se mantiene en el recinto.



La difusión la producen irregularidades en las paredes como adornos, figuras, paneles desordenados, etc. Dependiendo del tamaño de estas irregularidades las ondas se difundirán si las longitudes de onda son comparables a estos objetos, tal y como vimos en el apartado de perturbación de las ondas por objetos.

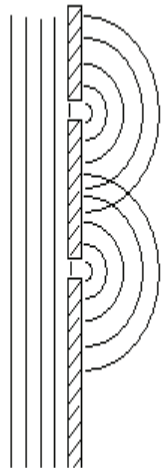
Este fenómeno se puede aplicar para difundir o difuminar ciertas frecuencias (y las superiores). Las frecuencias graves no interesa difundirlas ya que el oído humano no puede discernir la dirección de procedencia de tales ondas.

Consideramos un tono de 600 Hz ( $\lambda=0.56$  m), lo que supone un tamaño para los objetos capaces de perturbar estas frecuencias de radio  $a=\lambda/6=0.56/6=0.093$  m, unos 10 cm de radio han de tener nuestras rugosidades para difundir las ondas de frecuencias mayores de 600 Hz. Las ondas más graves consideran nuestra pared adornada con estas rugosidades como si fuera lisa y se produce una reflexión normal en las frecuencias bajas.

### Interferencias y ondas estacionarias

Consideramos de nuevo el frente de ondas plano que llega a una pared con dos aberturas pequeñas. Cada nueva abertura se comporta como una nueva fuente puntual que radia en todas direcciones. Después de la pared las ondas que surgen de las aberturas se encuentran e interfieren entre si.

Los puntos en los que las ondas se encuentren en fase, dos sobrepresiones, se suman y tendremos doble intensidad sonora. En otros puntos en los que las ondas se encuentran en contrafase, una sobrepresión con una depresión, se anulan las ondas y no se oirá nada.



Se da la interferencia constructiva (doble sonoridad) cuando la diferencia de recorridos es igual a un número par de veces la semilongitud de onda:

$$[d_1-d_2]=2n\lambda/2$$

y la interferencia destructiva (anulación del sonido) cuando la diferencia es igual a un número impar de semilongitudes de onda:

$$[d_1-d_2]=(2n+1)\lambda/2.$$

Este fenómeno de interferencias se produce también cuando una onda confinada en un recinto se refleja en dos paredes paralelas, o apoyos (el caso de la cuerda), y se encuentra consigo misma. La perturbación producida cuando pulsamos la cuerda viaja en las dos direcciones. Hay puntos del recinto en los que las ondas coinciden con la misma fase y se produce una suma de intensidades, por el principio de superposición, produciéndose máxima vibración, en cambio en otros lugares se anula la onda (vibración nula). Cuando esto ocurre decimos que se ha formado una onda estacionaria. La onda está viajando en el recinto, reflejándose en los extremos pero en promedio, y sobre todo visualmente, la sensación es de quietud de la onda: los puntos nodales y los puntos de máxima vibración permanecen fijos y no varían su posición.

En las cuerdas, tubos y tablas armónicas se producen estas ondas estacionarias. Son sistemas confinados en los que una perturbación viaja en todas las direcciones reflejándose en los extremos. Los lugares de encuentro de interferencia constructiva son los de máxima vibración y los de interferencia destructiva son los puntos o líneas nodales que vimos en el tema de las resonancias.



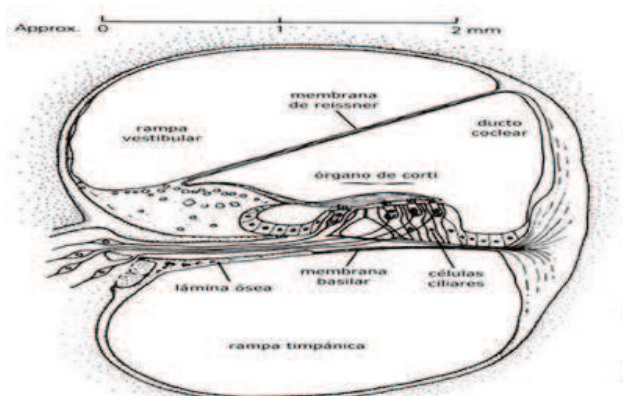
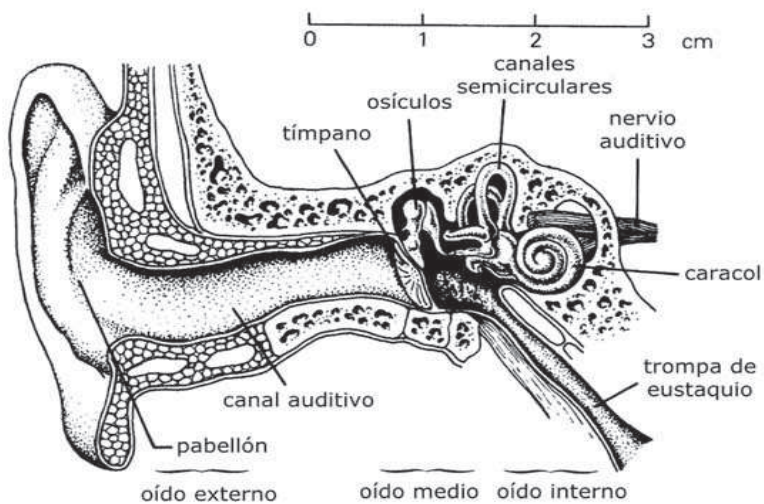
## 10. OÍDO Y AUDICIÓN

Las vibraciones que percibimos y que se traducen en nuestro cerebro en sensaciones sonoras son, como vimos ya, variaciones de presión, sobrepresiones y depresiones respecto de la presión atmosférica estacionaria que inciden sobre nuestro oído. Estas variaciones de presión llegan a nosotros a través del medio mecánico que en la inmensa mayoría de los casos que nos ocupa es el aire. Este medio mecánico tiene también capacidad para vibrar, contraerse y expandirse, como cualquier otro material elástico.

Lo primero que se encuentran estas variaciones de presión es el **OÍDO EXTERNO** que tiene la función de captar, canalizar y direccionar estas ondas conduciendolas hasta el tímpano.

El **OÍDO MEDIO** se encarga de transformar las variaciones de presión que inciden en el tímpano en vibraciones mecánicas y de paso amplifica la señal que le llega.

El último de los eslabones del órgano auditivo es el **OÍDO INTERNO** y es quien se encarga de transformar estas vibraciones mecánicas en pulsos fisiológicos. En esta parte del oído es donde se realiza la "transformada de Fourier" y las señales pasan por último al cerebro.



**Oído externo. Función receptora**

La oreja o pabellón auditivo es lo primero que encuentra la onda de presión sonora. Este elemento perturba, como vimos en anteriores capítulos, las señales a partir de ciertas frecuencias. En la cuenca de la oreja se producen reflexiones de las ondas que llegan del exterior de manera que podemos percibir la direccionalidad de las señales. En ciertos animales este fenómeno se puede apreciar observando el continuo movimiento que realizan con las orejas para captar y determinar mejor la procedencia de los sonidos.

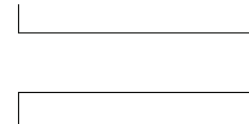
Tenemos un conducto auditivo externo (un tubo pequeñito) de unos 2,7 cm con sus resonancias, como todos los tubos. Estas resonancias tienen un factor de calidad bajo pues la carne blanda tiene muchas pérdidas por fricción, pelillos, cera y demás. Esto hace que la anchura de banda de estas resonancias sea grande y amplifique bien una cierta cantidad de frecuencias alrededor de la frecuencia de resonancia. Esta resonancia fundamental del conducto se calcula con la longitud efectiva  $L_e$  para los tubos cerrados-abiertos con pestaña. El radio del conducto es de 5mm aproximadamente:

$$L_e = L + 0.85 \times R \quad L = 0.027 \text{ m} \quad R = 0.005 \text{ m}$$

$$L_e = 0.027 + 0.85 \times 0.005 = 0.03125 \text{ m}$$

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{4L_e}$$

$$f = 340/4 \times 0.03125 = 2720 \text{ Hz}$$



Ésta es la frecuencia de resonancia del conducto auditivo. La extrema sensibilidad que tiene el oído humano a las frecuencias cercanas a los 3 kHz se debe en parte a esta frecuencia de resonancia específica de este conducto del oído externo. Las ondas que llegan al mismo pasan con más facilidad a través de él si sus correspondientes frecuencias se encuentran en el espectro de la anchura de banda de esta resonancia.

**Oído medio. Transformación acústico-mecánica**

Al final del oído externo se encuentra el **tímpano**, una membrana en tensión, semejante a la piel de un tambor, muy fina de 0.1 mm de espesor con una superficie media de 0.7 cm<sup>2</sup>. Cuando llegan las sobrepresiones y depresiones a esta membrana, se excita y vibra con el mismo patrón de vibración que la onda recibida. Estas vibraciones pasan a los tres huesecillos del oído medio: **martillo, yunque y estribo**. Las frecuencias de vibración que pueden llegar a alcanzar, por su tamaño, material y estructura, estos huesos son de unas 20000 por segundo como máximo, que no es poco.

Este recinto medio tiene comunicación con la cavidad bucal por medio de la **Trompa de Eustaquio** que se encarga de equilibrar las presiones atmosféricas que soportan los dos lados del tímpano. Cuando nos encontramos a gran altura la presión atmosférica exterior es pequeña. En el momento en el que comenzamos a descender la presión en la parte exterior del tímpano aumenta y éste se tensa hacia el interior disminuyendo la capacidad de respuesta del mismo. Este canal de comunicación entre el oído medio y el exterior a través de la boca hace que las presiones se compensen y el tímpano se sitúe en su posición óptima de funcionamiento. Bostezar o soplar con fuerza moderada tapando boca y nariz (práctica habitual en submarinismo) son métodos utilizados para compensar estas diferencias de presión. Abrir la boca bien y tomar aire frente a una explosión evita posibles roturas y daños irreversibles. La musculatura que sujeta el tímpano también ayuda a evitar deformaciones exageradas tensionándose frente a presiones sonoras elevadas.

La fuerza que hace el estribo en la ventana oval sobre la cual se apoya es 1.3 veces mayor que la fuerza ejercida por el tímpano sobre el martillo. Gracias a la disposición de los huesos se crea un efecto palanca que amplifica la señal. La ventana oval es unas 25 veces más pequeña que el tímpano con lo cual se puede calcular que la presión ejercida sobre la ventana es aproximadamente 30 veces superior a la que el tímpano ejerce sobre el martillo. Se produce una amplificación de presión en un factor de 30 y como  $I = P^2$ , la intensidad queda amplificada unas 900 veces.

**Oído interno. Transformación mecánico-eléctrica y Transformada de Fourier**

Pegado a la ventana oval tenemos el **caracol** o la cóclea, una pequeña lengua enroscada que se recoge sobre sí misma un poco más de dos vueltas. Tiene una longitud de 3 cm aproximadamente y dentro de este caracol está la parte más importante de todo el sistema auditivo, aquí es donde se generan los pulsos eléctricos que llegan al cerebro.

En el oído interno se encuentran tres conductos o canales semicirculares situados en diferentes planos y llenos de un líquido, de manera que ante inclinaciones de la cabeza o cuerpo en cualquier dirección al menos uno de los canales, y su líquido, sufren desplazamiento y se activan ciertos sensores, lo que hace que se detecte este movimiento. Estos canales

son los que se encargan del equilibrio y las anomalías en su funcionamiento tienen como consecuencia los síntomas del vértigo.

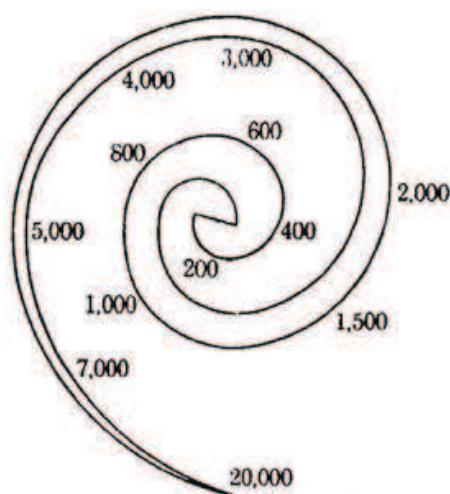
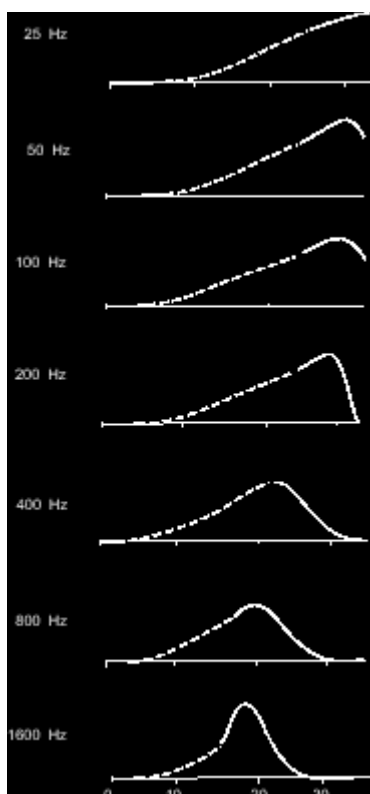
Dentro del caracol tenemos el conducto coclear en el cual está la membrana basilar. Es aquí donde se sitúa el **órgano de Corti**. Este órgano consta de unos 20000-30000 pelillos sumergidos en un líquido llamado endolinfa. Estos pelillos son los que producen pulsos eléctricos cuando son movidos por la endolinfa la cual se agita cuando llegan vibraciones de los huesos a través de la ventana oval. La **membrana basilar** llega casi hasta el extremo. Al final hay un agujero llamado helicotrema que conecta el conducto coclear con la ventana redonda. El líquido puede pasar a través de este agujero al conducto inferior del caracol y conectar con la ventana redonda. La función de esta ventanita es equilibrar las presiones y depresiones que se generan en la ventana oval.

De cada pelillo sale un nervio y estos 20000 "cables" componen el nervio acústico que llega hasta el cerebro. La membrana tectórica protege los pelillos de movimientos ajenos a las señales acústicas como movimientos de cabeza rápidos, etc. de esta manera cualquier perturbación queda anulada y las vibraciones que se producen en la membrana serán causadas únicamente por movimientos o vibraciones del estribo.

### Teoría de la localización

Una teoría que explica como percibimos las diferentes frecuencias es la teoría de la localización. La parte más cercana a la ventana oval se llama **zona basal** y el final es la **zona apical**.

La membrana basilar es la que hace el análisis de Fourier. Cuando se produce una vibración de una frecuencia determinada en la ventana oval, hay una zona de la membrana basilar que presenta mayor actividad. El líquido se agita más en esa zona concreta y los pelillos situados en esa región generan pulsos eléctricos gracias al movimiento al que son sometidos. Las vibraciones de baja frecuencia que llegan a la ventana oval hacen que resuene la endolinfa situada en la zona apical. Según aumenta la frecuencia, la zona que presenta mayor actividad del líquido se va retrasando y acercando hacia la zona basal.



Es de suponer que las frecuencias más altas que somos capaces de percibir pongan en marcha los pelillos que están situados justo al lado de la ventana oval. Cuando llega al oído una señal que resulta ser la suma de unas cuantas ondas de diferentes frecuencias, en la membrana basilar aparecerá actividad en las zonas que corresponden a las frecuencias que componen la señal.

Esta teoría no resuelve todos los problemas pues si bien soluciona el análisis de las frecuencias no explica nada a cerca de ciertos fenómenos de frecuencias altas, armónicos superiores y reconstrucción de la altura de tono del fundamental cuando este no tiene amplitud.

### Teoría de la periodicidad

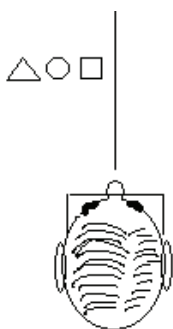
-While place theory tries to explain pitch sensation by finding places in the basilar membrane where the excitation by the stimulus is maximal, temporal theory is a time-domain mechanism which is event-based; i.e., it tries to detect the time interval between *events*, which may be peaks or overall envelope of the input waveforms. These events determine the periodicity of the waveform, and the reciprocal of the periodicity is the same as the fundamental frequency. In his residue pitch theory, Schouten (Schouten 1938; Schouten, Ritsma, and Cardozo 1962) mentioned the important role of unresolved high harmonics. According to him, pitch sensation of a complex tone occurs when an interaction of those several unresolved harmonics results in a periodic time pattern of the waveform, and the residue pitch is determined by the periodicity. Estudios realizados por estas tres personas (Oxenhan, Bernstein, and Penagos) revelan la validez de la teoría de la localización.-

Las células del órgano de Corti son las encargadas de generar pulsos fisoeléctricos que van a parar a la zona del cerebro correspondiente. Tenemos un lenguaje binario, llega un pulso o no llega. La teoría de la periodicidad nos dice que en cada zona específica de la membrana basilar, para una frecuencia determinada, un grupo de células va a trabajar conjuntamente para enviar al cerebro más o menos pulsos eléctricos en función de la frecuencia que llega al oído. Se cree que las células tan solo son capaces de vibrar 1000 veces por segundo y que se reparten el trabajo para poder responder a frecuencias superiores. Hay fenómenos que no se explican con la teoría de la localización por lo que se cree que ha de existir otra manera de percibir la altura de tono. La teoría de la periodicidad podría ser otra manera de explicar el fenómeno de la sonoridad. Estímulos con poca sonoridad pondrían en marcha pocos pelos y llegarían al cerebro pocos pulsos de una misma zona. Si aumenta la sonoridad las células se reparten el trabajo y llegan más cantidad de pulsos de esa misma zona.

### Actividad de los hemisferios cerebrales

En 1861 el forense Pier Paul Broca se percató de que los humanos hablábamos con una zona del cerebro localizada en el hemisferio izquierdo. Llegó a esta conclusión diseccionando los cerebros de personas que habían vivido con problemas de habla.

Más tarde, en 1960 Roger Sperry retomó los estudios anteriores y se reafirmó en lo mismo. El lado izquierdo del cerebro se encarga de las funciones del habla. Se supo también que el hemisferio derecho controla y gobierna la parte izquierda del cuerpo y el hemisferio izquierdo controla la parte derecha. Experimentó con epilépticos a los que se les practicaba una operación de desconexión de los dos hemisferios del cerebro para paliar la epilepsia. Estos eran los sujetos apropiados para comprobar este fenómeno de "cruce de cables".



En los seres humanos y demás animales existe un flujo de información entre los hemisferios derecho e izquierdo pero en las personas epilépticas operadas esta vía de transmisión de datos estaba cortada y se pudieron descubrir ciertas funciones del cerebro.

En el experimento la persona tiene los hemisferios desconectados. Se muestran unas figuras en la pantalla izquierda. Cada ojo ve una cosa diferente. El jefe le dice al sujeto que coja el cubo que está viendo. La señal del cubo entra por el ojo izquierdo y llega al hemisferio derecho. Al hemisferio izquierdo no llega visión alguna y como éste es el que gobierna el habla dice la persona "que no ve nada" pero la frase entra por los dos oídos y lo que entra por el oído izquierdo llega al hemisferio derecho "no veo nada", pero si ha visto algo, se crea una confusión, rectifica y coge el cubo.

Basándose en estos experimentos se han podido conocer diferentes funciones que controla cada hemisferio:

Hemisferio izquierdo

Habla  
Pinta mal, no tiene sentido del espacio  
Lee, escribe, calcula  
No distingue timbres  
Imágenes grandes, rasgos no definidos  
Tiene sentido del tiempo  
Optimista

Hemisferio derecho

Mudo, canta, crea música  
No escribe, pinta bien  
Suma hasta 20, no resta, ni / ni X  
Distingue timbres  
Ve rasgos y detalles  
No tiene sentido del tiempo  
Pesimista

Oriente trabaja más con el hemisferio derecho y occidente con el izquierdo, esto se puede ver en la forma de pensar, racionalismo, empirismo, formas de escribir, etc.

Dependiendo de la actividad que realicemos se activan diferentes zonas del cerebro. Si escuchamos música, sintiéndola, sin analizar entonces se activan zonas del H.D. pero si empezamos a pensar y analizar los intervalos, la medida, tonalidad, etc. la actividad se desplaza al H.I. Cuando hablamos casi toda la actividad se observa en la parte izquierda. Con las nuevas tecnologías se ha podido descubrir que parte del cerebro se encarga de cada función.

## 12. ACÚSTICA DE SALAS

En la antigüedad se construían diferentes tipos de salas, con diferentes diseños, hasta que daban con uno bueno y conseguían una buena sonoridad, después se procuraba copiar este diseño en las posteriores salas.

Ya en los tiempos de la antigua Grecia la preocupación por una buena acústica estaba muy presente. Pitágoras experimentó mucho con el tema de la acústica, los sonidos, las cuerdas, etc. y es el primer científico del que se tiene constancia sobre este tipo de trabajos. Probablemente él y su grupo también estudiaron los diferentes diseños de un anfiteatro que haría la escucha de la obra más precisa y en el que cupieran más espectadores.

El diseño de los antiguos anfiteatros está, acústicamente, muy logrado y cumple bien las necesidades que se le exigen. La proyección del sonido se logra bien con la pared trasera del escenario y el sonido llega bien a todo el público gracias a la inclinación de las gradas, además la forma semicircular de éstas es la mejor manera para que el mayor número de público vea lo más cerca posible la obra.

Hoy en día también se pueden construir buenas salas con todos los conocimientos teóricos que hay sobre acústica. Se tiene un control científico sobre esta problemática, aún así, siempre se suele presentar algún que otro inconveniente o problema una vez construida la sala.

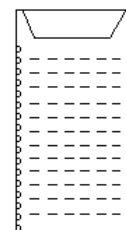
- Problemas de tipo físico presentados por las reflexiones de las ondas en los materiales. Éstos, junto con la geometría, condicionan el comportamiento de las ondas con los fenómenos de reflexión, difusión y absorción.
- Problemas de tipo psicoacústico. Reflexiones indeseadas que distorsionan la sensación de sonido directo. El sonido no parece que llegue desde donde esta situada la orquesta.
- Surgen problemas de tipo preferencial. Una sala puede ser buena para interpretar música sinfónica pero poco adecuada para música de cámara. Para un colectivo determinado algunas salas son muy buenas y otras no tan buenas. La reverberación es una cualidad de la sala que gusta a unos oyentes más y a otros menos. Los nórdicos prefieren las salas con poca reverberación.

Existen una serie de exigencias para la buena acústica de una sala. Se le pueden exigir determinadas características para que la escucha sea óptima:

- . Ausencia de ruidos exteriores e interiores.
- . Buena transmisión del sonido desde el escenario a todos los puntos del auditorio.
- . Buena audición entre los intérpretes.
- . Respuesta idónea en toda la gama de frecuencias.
- . Estabilidad de temperatura y humedad.
- . Reverberación adecuada.
- . Ausencia de eco.
- . Sensación nítida de direccionalidad, el sonido llega desde el escenario.
- . Calidez y claridad.
- . Equilibrio de respuesta. Todos los instrumentos han de oírse por igual.
- . La sala vacía ha de sonar tan bien como cuando está el aforo completo.
- . Amplia respuesta y dinámica. Rapidez de respuesta.

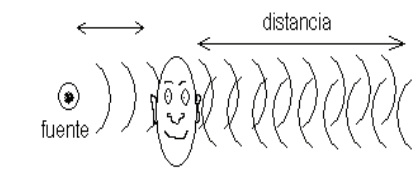
Hace ya unos cuantos años se hizo, entre los directores de orquesta, una encuesta para determinar cuáles son las mejores salas del mundo y las mejor consideradas fueron las siguientes:

- |                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| 1. Music Vereinham       | VIENA (1870)        |
| 2. Concertgebon          | AMSTERDAM (1877)    |
| 3. Teatro Colón          | BUENOS AIRES (1904) |
| 4. Sinfphony Hall        | BOSTON (1900)       |
| 5. Konsert Huset         | GÖTEBORG (1935)     |
| 6. Palais Des Beaux Arts | BRUSELAS (1929)     |



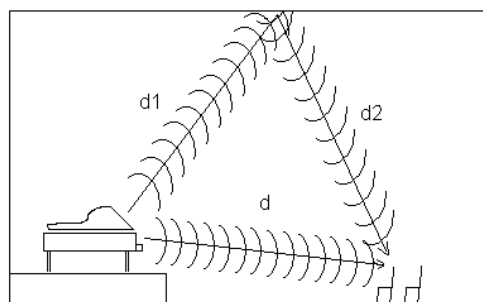
Se puede resaltar que todas ellas tienen una planta rectangular alargada, son de la época neoclásica y son muy buenas para la música sinfónica. En Bilbao existe una sala, La Filarmónica, muy buena para la música de cámara por su carácter seco, poca reverberación, pero no lo es tanto para la música sinfónica. Las plantas rectangulares alargadas satisfacen muy bien ciertos fenómenos relacionados con la percepción y el sonido directo. El neoclásico se caracteriza por su arquitectura con adornos que resultan muy positivos para la difusión del sonido.

### Eco y reverberación



El eco es la vivencia de un mismo sonido que una vez cesado vuelve a escucharse. Este fenómeno se debe a una reflexión lejana. Si nos situamos frente a una pared a una distancia de más de 14 m y producimos un sonido, nuestros oídos escuchan inmediatamente el sonido generado por nosotros y al de poco tiempo volvemos a escuchar ese mismo sonido que ha recorrido el camino de ida hasta la pared y vuelta hasta nosotros.

Vamos a tener en cuenta un dato muy importante que es el tiempo que necesita el oído para relajarse después de un estímulo y percibir otro distinto al anterior. En capítulos anteriores vimos como este tiempo de relajación es de aproximadamente 80 ms. Consideramos una señal generada en una sala: a nosotros nos llega el primer estímulo directo de la señal -distancia  $d$ - y las reflexiones que se producen en la sala nos llegarán sucesivamente una tras de otra en intervalos de tiempo que dependerán de la distancia recorrida por la señal -en la reflexión del techo  $d_1+d_2$ -. La diferencia entre los dos caminos es lo que vamos a tener en cuenta para percibir eco o reverberación.



### Tiempo de reverberación

Si las señales reflejadas llegan al oído antes de que este se relaje, antes de 80 ms, entonces no escuchamos eco sino que la señal reflejada refuerza a la primera y se produce la reverberación. Podemos tener infinidad de reflexiones que llegan al oído cada vez con menor intensidad, consecutivamente con intervalos menores de 80 ms durante unos cuantos segundos. En estas condiciones se dice que la sala tiene tantos segundos de reverberación. **Definimos la reverberación como el tiempo que tarda un sonido, una vez que cesa de emitir la fuente, en decaer 60 dB.**

En una sala serán más adecuados unos tiempos de reverberación que otros. Esto dependerá del tipo de música que se va a interpretar y de los instrumentos con los que se interpreta la música. Este tiempo de reverberación depende, entre otras cosas, del volumen de la sala. Cuanto mayor es el volumen mayor es este tiempo de reverberación  $T$ , también llamado RT60. En esta tabla podemos ver diferentes valores de la reverberación para salas de volúmenes diferentes:

VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	100	1000	10000
Órgano		1.5	2.1
Sinfónica		1.4	1.8
Ópera		1.25	1.5
Música de Cámara		1.0	1.4
Conferencia	0.5	0.75	1.0

Una ópera necesita ser representada en una sala con poca reverberación para que el sonido sea limpio y se oiga con claridad lo que el cantante canta y lo que cuenta.

Para música por ejemplo de Brams, Beethoven, sinfonías de Wagner, etc. la reverberación alta es positiva  $T=2.1$  seg. Estas obras necesitan esa reverberación para ser escuchadas con todo su carácter de grandiosidad. En general, la música romántica de carácter lento se escucha bien en salas con mayor tiempo de reverberación.

La música barroca (Mozart, Bach, etc.), música de cámara, ciertos autores clásicos como Stravinsky, modernos como Schönberg, etc. requieren de tiempos de reverberación menor  $T=1.5$  seg. No necesitan la sensación de grandiosidad, ya que sus composiciones son más rápidas y con muchos adornos que requieren de una sala clara o seca para que todos los detalles se perciban bien.

Si quitamos toda la reverberación a la sala, como en una sala anecoica, se escuchará muy claro y limpio pero a la interpretación le faltará cuerpo y tendremos cierta sensación de aislamiento. Las reflexiones y la energía sonora que se mantiene en la sala ayudan a crear un ambiente cálido y acogedor. En los estudios de radio y televisión es necesaria poca reverberación.

La fórmula que obtuvo Sabine para el tiempo de reverberación fue:

$$T = \frac{55,2 \times V}{C \times a}$$

En esta fórmula **V** es el volumen de la sala calculado en m<sup>3</sup>, **C** es la velocidad del sonido y **a** lo calcularemos de la siguiente manera: es la suma de todos los términos que resultan de la multiplicación del área en m<sup>2</sup> de cada superficie **s** diferente por el coeficiente de absorción **α** correspondiente al material de la superficie considerada. De cada superficie de material diferente obtenemos un término y se realiza la suma de todos ellos. La unidad de medida de este parámetro **a** es el sabín.

$$a = \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \alpha_4 s_4 + \dots + \alpha_n s_n = \sum \alpha_i s_i$$

Los buenos directores de orquesta pueden llegar a detectar hasta variaciones en el tiempo de reverberación de 0.1 seg. por lo que esta precisión es necesaria. Esta fórmula es antigua y existen hoy en día fórmulas más precisas, pero con ella podemos hacernos una idea de cómo se hacen los cálculos y obtener datos aceptables. Si la sala es grande se producen menos reflexiones y por consiguiente menos absorción por lo que la reverberación aumenta. Cuanto mayor sea la superficie también se produce más absorción y estos dos parámetros se compensan. Se pueden construir salas con mucho volumen y mínima superficie o máxima, dependiendo de la geometría utilizada y de lo que interese.

Una cámara anecoica ha de tener un tiempo de reverberación nulo si esta bien construida, con una superficie inmensa y un material muy absorbente, aún así con la fórmula de arriba obtenemos un valor diferente de cero. La fórmula sobrevalora las salas muy secas pero va bien para las normales. Se puede utilizar para obtener los valores de los coeficientes de absorción de los diferentes materiales aunque dará valores un poco altos. Si se aplican estos mismos valores en esta fórmula de Sabine se compensan los errores. Aunque nos puede dar una idea aproximada existen tablas más precisas que ésta siguiente:

MATERIAL	125	250	500	1000	2000	4000	(Hz)
Ventana abierta	1	1	1	1	1	1	
Azulejo acústico rígido	0.2	0.4	0.7	0.8	0.6	0.4	
Azulejo acústico, paneles	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7	0.5	
Artesonado de madera	0.3	0.15	0.1	0.05	0.04	0.05	
Hormigón, Mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	
Cortinas medias	0.07	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	
Asientos tapizados ocupados	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	
Asientos tapizados libres	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	
Asientos madera ocupados	0.4	0.4	0.7	0.7	0.8	0.8	
Asientos madera libres	0.02	0.03	0.03	0.06	0.06	0.06	

La madera compensa a otros materiales ya que absorbe más los graves que los agudos. En general los materiales absorben más los agudos. Las salas construidas con mucha madera serán muy brillantes.

Hoy en día se hacen estructuras, utilizando madera en la cara vista, con aberturas y pequeñas cámaras que funcionan como resonadores de Helmholtz para obtener materiales con coeficientes de absorción mayores que el de la madera pero con la estética agradable y cálida de la madera.

Una fórmula diferente para calcular el tiempo de reverberación puede ser la siguiente,

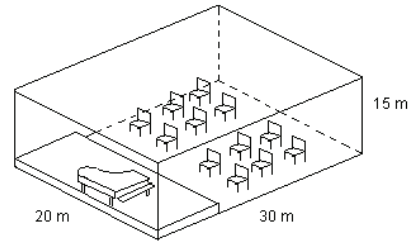
Ley de Eyring:  $T = (-55.2 \times V) / (S \times c \times \ln(1 - \alpha))$  donde  $\alpha = (\sum \alpha_i s_i) / S$  donde **S** es la superficie total.



**Problema de aplicación:**

Tenemos una sala de dimensiones 30x20x15 m con los siguientes datos sobre los materiales con los que se ha construido la sala:

- |   |                 |
|---|-----------------|
| 1. $\frac{3}{4}$ de planta con público    | $\alpha_1=0.8$  |
| 2. $\frac{1}{4}$ de la planta (escenario) | $\alpha_2=0.6$  |
| 3. pared del fondo                        | $\alpha_3=0.7$  |
| 4. techo                                  | $\alpha_4=0.1$  |
| 5. laterales                              | $\alpha_5=0.1$  |
| 6. frontal                                | $\alpha_6=0.05$ |



$$V=30 \times 20 \times 15=9000 \text{ m}^3$$

Para calcular el tiempo de reverberación de esta sala utilizaremos la fórmula sencilla de Sabine:

$$T = \frac{55,2 \times V}{C \times a} \quad T=(55,2 \times 9000)/(340 \times 825)=1,77 \text{ seg.}$$

$$a = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 + S_4 \alpha_4 + S_5 \alpha_5 + S_6 \alpha_6 = \\ \frac{3}{4} \times 30 \times 20 \times 0,8 + \frac{1}{4} \times 30 \times 20 \times 0,6 + 20 \times 15 \times 0,7 + 30 \times 20 \times 0,1 + 2 \times 15 \times 30 \times 0,1 + 15 \times 20 \times 0,05 = \\ 360 + 90 + 210 + 60 + 90 + 15 = 825 \text{ sabines}$$

Esta sala, tal y como esta construida, tiene un tiempo de reverberación de 1.77 segundos lo cual hace que la sala sea adecuada para interpretar música sinfónica diversa de autores románticos como Bethoven, Brams, etc. pero también será aceptable para música que requiera de un tiempo de reverberación sensiblemente menor al de 2 segundos específicos de la música sinfónica.

Si en la sala anterior queremos interpretar música que requiere de un tiempo de reverberación menor podemos ajustarla substituyendo alguno de los materiales. Las condiciones óptimas para interpretar música de Mozart son  $T=1.5$  segundos. Podemos calcular el nuevo valor de  $a$ :

$$T=1,5=(55,2 \times 9000)/(340 \times a) \quad ; \quad \text{el valor nuevo para } a=974,12$$

Tenemos un público que ha de ser fijo en su capacidad de absorción. El fondo del auditorio también ha de absorber el sonido que le llega y el frontal ha de ser reflectante. los materiales del techo y laterales son los únicos que podemos cambiar, los cuales en nuestra sala son bastante reflectantes, y colocaremos materiales más absorbentes para la nueva sala. La incógnita es ahora el nuevo coeficiente de absorción que lo multiplicamos a la suma del área total de paredes laterales y techo:

$$974,12=360 + 90 + 210 + \alpha(2 \times 30 \times 15 + 20 \times 30) + 15$$

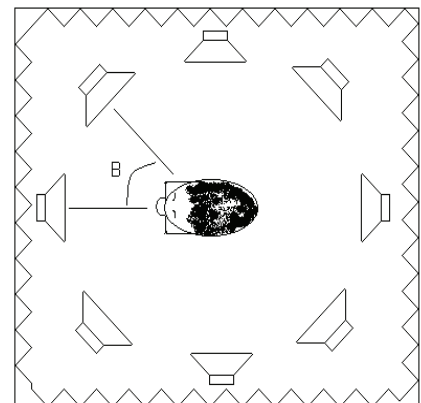
$$1500\alpha=974,12 - 360 - 90 - 210 - 15=299,12$$

$$\alpha=299,12/1500 \approx 0,2$$

Podemos substituir el material del techo y los laterales por otro un poco más absorbente  $\alpha=0.2$  y de esta manera obtenemos un tiempo de reverberación para la sala de 1.5 segundos.

**Sensación de sonido directo**

Los investigadores Reichhardt y Schmidt experimentaron, entre otras cosas, con la sensación de sonido directo. Este efecto es muy importante en las salas. En una buena sala la música que oímos nos da la sensación de que viene del lugar en el que se sitúa la orquesta. Se puede experimentar en que condiciones se deja de percibir sonido directo. Utilizaron para la experiencia una cámara anecoica  $\alpha=1$  en la cual situaron a una persona rodeada de altavoces de manera que podían recrear las sucesivas reflexiones que se generan en una sala. El sonido directo llega al oyente desde el centro y con un pequeño retardo y una atenuación se puede simular el sonido reflejado en las diferentes paredes de la supuesta sala.



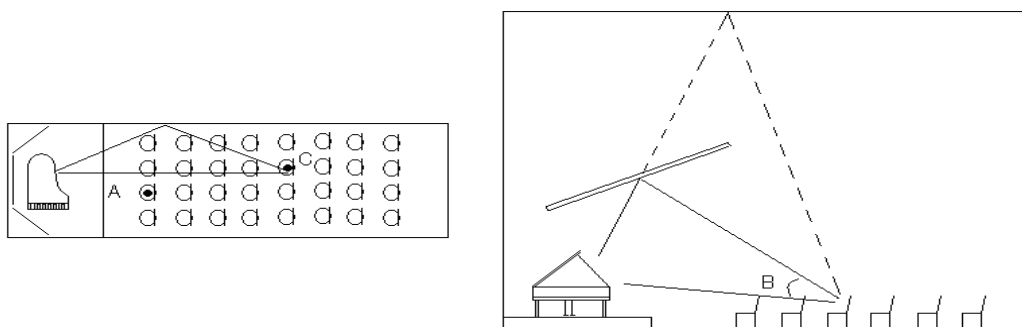
Se llego a la siguiente conclusión:

RETARDO (ms)	ÁNGULO	EFECTO
1. $t \leq 25$	cualquiera	Sonido directo
2. $25 \leq t \leq 80$	$\beta \leq 40$	Sonido directo
3. $25 \leq t \leq 80$	$40 \leq \beta$	reverberación
4. $80 \leq t$	cualquiera	eco

Estos señores vieron cuatro grupos de fenómenos:

1. Con un tiempo de retardo pequeño  $t \leq 25$  ms entre un altavoz y otro, para cualquier ángulo, el sonido se escucha como directo.
2. Si el ángulo del sonido reflejado es pequeño  $\beta \leq 40^\circ$  es aceptable un retardo de hasta 80 ms para seguir teniendo sensación de sonido directo.
3. Para ángulos mayores un retardo entre 25 y 80 milisegundos nos da una sensación de reverberación y el sonido no parece tan directo.
4. A partir de los 80 ms si llega alguna señal reflejada, desde cualquier ángulo, se empieza a percibir eco y la sensación de sonido directo se rompe.

Podemos recordar como la constante de relajación del oído se encuentra entre 50 y 100 ms y este tiempo es determinante para la escucha y la percepción del sonido directo.



Las salas alargadas no suelen generar reflexiones lejanas, al menos con las paredes, y éste es uno de los motivos por el cual son muy apreciadas por los directores de orquesta y el público exigente.

Si el techo de estas salas es demasiado alto se pueden producir reflexiones que superen este retardo de 80 ms. Debemos procurar que los ángulos de las diferentes reflexiones no superen los  $40^\circ$ .

En el primer dibujo, en el punto A del auditorio tenemos mucho sonido directo. En el punto C hay menos sonido directo pero está reforzado por las reflexiones menores de  $40^\circ$  que generan la ilusión de sonido directo. Las salas en las que se sitúa el escenario centrado y el público alrededor tienen una distancia mínima entre público y orquesta pero acústicamente no son mejores. En las salas con techos altos se colocan paneles para evitar las reflexiones demasiado largas y reducir el ángulo B. De esta manera el ángulo de reflexión es menor y se consigue mejor sensación de sonido directo.

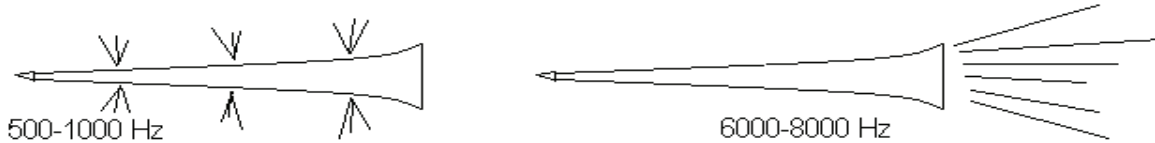
### Dirección de radiación de instrumentos musicales

Diferentes investigadores han realizado estudios sobre la capacidad radiativa y la dirección de radiación de la energía sonora de los diferentes instrumentos. En las cámaras anecoicas se pueden experimentar también aspectos de la percepción humana. Se ha visto como el oído derecho escucha menos brillante que el izquierdo.

Los instrumentos no radian la misma cantidad de energía en todas las direcciones y en consecuencia podemos percibir de diferente manera un instrumento interpretado dependiendo de la posición que tomemos respecto de éste: a los lados, de frente, etc.

En una cámara reverberante diferentes instrumentos pueden llegar a parecer el mismo debido al eco y un solo instrumento puede sonar de forma que parezcan unos cuantos tocando. El parámetro de la reverberación ha de controlarse muy bien en las salas para que no se desvirtúen las características sonoras de los diferentes instrumentos y de la orquesta en su conjunto.

Los instrumentos de arco, por debajo de los 500 Hz irradian en todas las direcciones pero a frecuencias más altas las direcciones de radiación son más específicas. Pasa algo parecido con los instrumentos de viento. A frecuencias altas la radiación es más direccional, más longitudinal.



Este hecho ha de tenerse en cuenta a la hora de diseñar la disposición de los diferentes instrumentos dentro de la orquesta de manera que la mayor cantidad de sonido llegue al público.

### Claridad

Actualmente se utilizan pulsos de corta duración para las medidas acústicas, como pequeñas explosiones, ya que las ondas que circulan por la sala son más fáciles de controlar y permiten excitar un mayor número de resonancias de la sala que se va a estudiar. Una pequeña explosión nos proporciona una señal parecida a un ruido blanco y permite estudiar el comportamiento de la sala en un mayor rango de frecuencias.

Definimos la **claridad acústica** como el logaritmo de la relación entre la intensidad sonora que nos llega en los primeros 80 ms (primeros 50 ms en algunos casos) y la que llega después. El número obtenido nos da una medida de la claridad de la sala. Cuanto mayor sea este número que obtenemos más limpio y rápido será el sonido en esta sala.

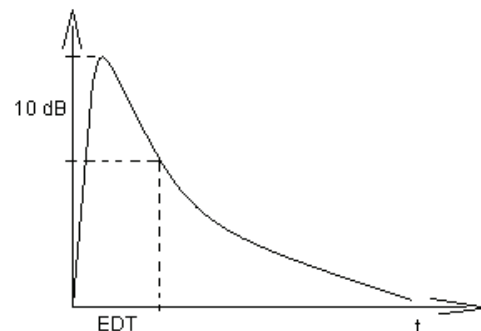
Para escuchar obras, por ejemplo de Mozart ( $T=1.5$  seg), es conveniente que la claridad sea cero  $C=0$ , es decir, que en los primeros 80 ms nos llegue la misma energía que en los posteriores.

Las salas reverberantes tienen una claridad negativa, llega más energía después de los 80 ms, y las salas muy secas tienen una claridad positiva, la energía que llega en los primeros 80 ms es mayor que la restante. Estas salas son muy limpias y claras pero se pierde grandiosidad.

### Tiempo de Decaimiento Primario EDT

Este tiempo EDT se define como el tiempo que tarda una señal en decaer 10 dB. Ahora la señal es un pulso instantáneo, una delta de Dirac.

Utilizamos como pulso un disparo y medimos con un sonómetro cómo evoluciona la señal en la sala. Los diferentes materiales absorberán la energía sonora y el tiempo de decaimiento primario nos da información de la capacidad de absorción de estos materiales. Este parámetro es muy parecido al tiempo de reverberación que vimos anteriormente. Cuanto más absorbentes sean los materiales menor es el EDT.



Se suelen hacer varias medidas en diferentes lugares del auditorio. Una buena sala nos dará un valor para el EDT parecido en todos los sitios. Si tomamos una medida del EDT en el escenario obtenemos una idea de lo rápido que sale el sonido y se proyecta hacia el auditorio. En los puntos restantes nos da información parecida a la reverberación.

### Tiempo de Elevación ET

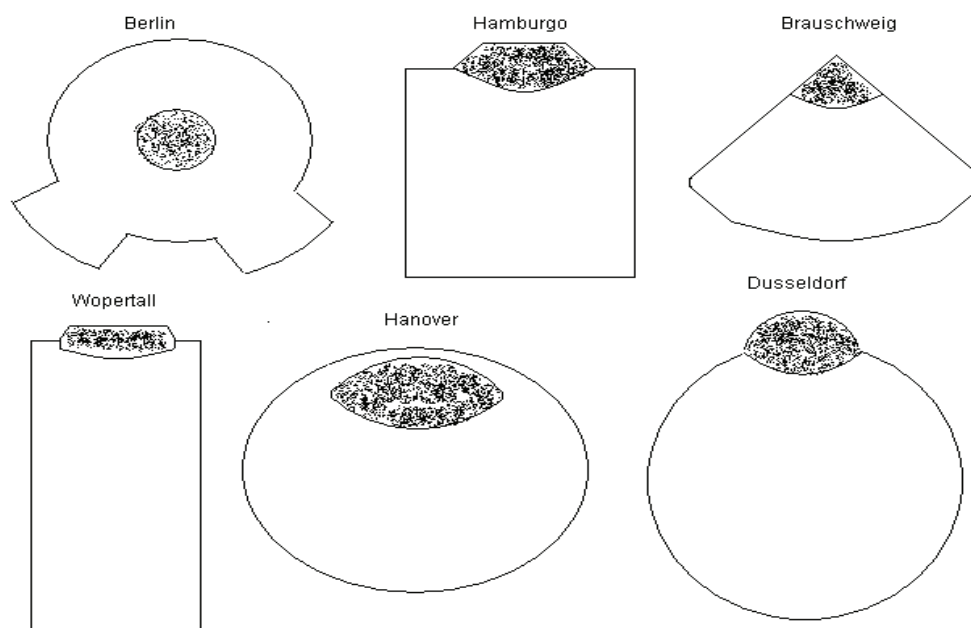
Es el tiempo que tarda en llegar el 50% de la energía. De toda la energía sonora que nos llega, calculamos el tiempo que tarda en llegar la mitad de la misma. Este valor de ET y el EDT están bastante relacionados. Si el EDT es grande también lo será ET. Si tomamos medidas en el auditorio de este tiempo de elevación obtenemos información sobre la rapidez con la que responde la sala. Si en poco tiempo -RT pequeño- nos llega la mitad de la energía quiere decir que la sala responde muy rápidamente.

El parámetro que se utiliza hoy en día es el  $T_s$  o tiempo central, que calcula algo parecido al tiempo de elevación y nos vale para describir el balance entre la claridad y la reverberación.

Un escenario demasiado claro y con una proyección de sonido muy rápida hacia el auditorio puede generar confusión en los músicos ya que puede que no se escuchen entre ellos y no tengan referencias de las melodías de los demás intérpretes. Esto puede provocar problemas de desafinación entre cuerda y viento, p.e., o grupos de instrumentos distanciados entre sí.

### Ejemplos de salas de conciertos

<u>Sala</u>	<u>Aforo</u>	<u>Volumen</u>	<u>Puntuación</u>	$l_{RT}$	$\Delta EDT\%$	T(seg.)
Berlín	2200	25000	5.6	0.57	17.8	2.0
Hamburgo	1980	11600	7.5	1.41	8.6	2.2
Braunschweig	2166	19000	3.7	1.11	21.0	1.9
Wopertall	1614	25000	5.1	1.3	11	2.7
Hanover	3360	34000	4.3	0.95	14	2.0
Dusseldorf	1842	33000	4.1	0.73	27	2.5

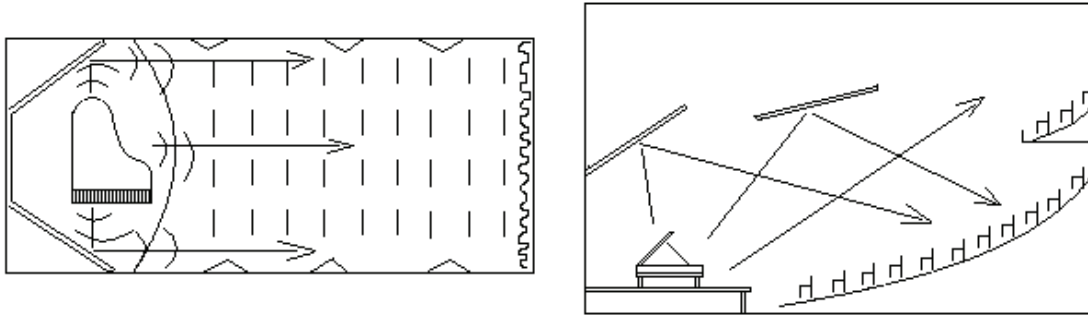


Un parámetro importante de las salas es el incremento del EDT,  $\Delta EDT\%$  es la variación que existe entre los tiempos de decaimiento primario medidos en diferentes lugares del auditorio. Es conveniente que las variaciones sean pequeñas. Esto será un indicador de la homogeneidad de la sala. En las salas arriba mencionadas se puede observar que cuanto menor es este dato de la variación, en general, mejor valorada está la sala. El sonido en estas salas se reparte por igual lo que da calidad a la sala.

### Mejoras y adecuaciones acústicas de las salas

Cualquier sala destinada a algún tipo de acto en el que la información se transmita por medio de energía sonora habrá de ser tratada y acondicionada al menos para que cumpla unas condiciones acústicas mínimas de manera que la charla, obra teatral, concierto de música, etc. llegue a nosotros en buenas condiciones y podamos disfrutar del evento de forma relajada. Se puede estudiar cada caso y ver qué mejoras se pueden llevar a cabo para que el sonido sea claro, la reverberación justa, se escuche bien desde todos los lugares y tengamos una sensación de sonido directo y un confort aceptable.

Una característica muy recomendable es que el escenario donde se sitúan los instrumentos este revestido de un material reflectante y a ser posible con las paredes traseras y laterales formando un trapecio. De esta forma nos aseguramos que el sonido generado se proyecta bien hacia el auditorio y no se pierde, como es el caso de los teatros en los que gran cantidad de energía sonora se pierde en los entramados, tramoyas y cortinas situadas a los lados del escenario. Unos paneles reflectantes móviles pueden ser una buena solución para convertir un teatro en una sala de conciertos aceptable. Por otra parte la trasera del auditorio se ha de revestir de un material absorbente para evitar el indeseado eco.

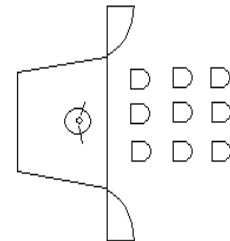


La claridad acústica está relacionada con la cantidad de energía que nos llega en los primeros 80 ms. En este tiempo el sonido puede recorrer una distancia de unos 27 metros. Las reflexiones que se producen no han de sobrepasar en 27 m a la distancia que existe en línea recta hasta el escenario de lo contrario la sensación de reverberación comienza a confundirse con el eco y desaparece la sensación de sonido directo.

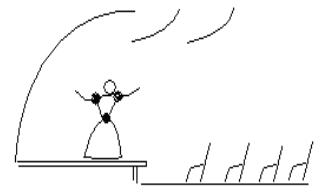
Si los músicos se sitúan al borde del escenario el sonido no rebota del todo en el suelo y no se proyecta bien hacia los anfiteatros por lo que es conveniente dejar un espacio mínimo libre en el escenario.

En el Metropolitan Opera House de N.Y. se trabajó con estos parámetros. Las voces de ópera en esta sala no salían con el brillo que les correspondía. Para corregir esto aumentaron la sensación de sonido directo y el EDT.

Construyeron un marco curvo, una especie de portal con un ángulo lateral de forma que el sonido se proyectaba hacia el auditorio y no se perdía en los laterales.

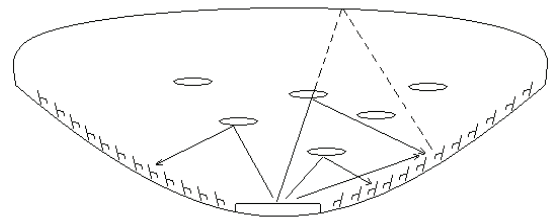


Se pusieron paneles circulares convexos que reflejaban las ondas que subían hacia el techo disminuyendo así la distancia de las reflexiones y el ángulo. Se consigue de esta manera proyectar el sonido hacia el auditorio y no se pierde.



Si las reflexiones son muy grandes entonces aumenta la reverberación y este valor alto no es bueno para interpretar ópera. Para este tipo de música se requiere de una sala con mucha claridad acústica o poca reverberación.

Otra sala en la que se pudieron hacer mejoras es la Opera House de Sydney. Esta sala tiene forma de arena con el escenario en el centro para disminuir la distancia media al público situado cerca del escenario. De esta forma teóricamente la sensación de sonido directo queda garantizada. En esta sala aunque el valor del EDT era pequeño no había sensación de sonido directo.



Se hicieron varias pruebas con lentejas gigantes de 1.5 m de diámetro suspendidas del techo a unos 10 m de la orquesta. De esta manera se consiguió evitar la reflexión larga con el techo y disminuir así el ángulo de la onda reflejada. Aumentó la sensación de sonido directo. Finalmente se optó por unas figuras toroidales de metacrilato con mayor curvatura de forma que el sonido quedaba difuminado. Las ondas graves de longitud de onda larga pasan mejor a través de estos toroides.

En una sala es bueno que el EDT sea similar en todos los lugares del auditorio y también es preferible que sea muy similar para todo el rango de frecuencias. Normalmente para las bajas frecuencias el EDT suele ser algo mayor. El carácter tímbrico de la sala tiene que ver con este hecho.

En la sala Avery Fisher Hall de N.Y. había muchas frecuencias graves y faltaban agudas. Esto se pudo solucionar con paneles de madera del tamaño suficiente para que perturbe y refleje únicamente las frecuencias agudas. Se puede calcular el radio necesario de los paneles teniendo en cuenta la condición que vimos para la longitud de onda  $\lambda \geq 6a$ . Las longitudes de onda superiores a 6 veces el radio de los paneles no se verán perturbadas por éstos y pasarán hacia el techo donde se puede colocar algún material algo más absorbente. Las longitudes de onda inferiores –frecuencia más alta- se verán reflejadas por los paneles y se proyectarán mejor hacia el público.

En algunas salas se han llegado a construir techos falsos correderos para modificar el volumen de la sala y disminuir así el tiempo de reverberación. De este modo se pueden interpretar de manera óptima varios estilos de música aunque esta solución está en desuso al alterar el volumen y la estética de la sala. Se pueden instalar también paneles giratorios cuyas caras se revisten de materiales con diferentes coeficientes de absorción, de esta forma se puede variar el tiempo de reverberación sin más que girar todos o alguno de los paneles hasta dar con el tiempo adecuado para la obra que se quiere interpretar.

En el norte de Europa gustan las salas con poca reverberación, salas muy claras y limpias. Este tipo de salas no pueden llegar a ser muy grandes ya que se utilizan materiales muy absorbentes que se comen parte de la energía acústica de la sala. Lejos del escenario la cantidad de sonido que llega sería más bien poca en una sala grande y seca, recordemos que la sonoridad baja casi a la mitad cuando se duplica la distancia.

En la siguiente tabla se representan los tiempos de reverberación para las diferentes frecuencias de algunas de las mejores salas de conciertos.

	T/frec.	125	250	500	1000	2000	4000
Konserthuset	Goteborg	1.9	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5
Synphony Hall	Boston	2.2	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5
Concertgebouw	Ámsterdam	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6
Musicvereishous	Viena	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9	1.6
Palais BeauxArts	Bruselas	1.9	1.8	1.5	1.4	1.3	1.1
Teatro Colón	Buenos Aires				1.7		
Metropolitan Opera	N.Y.	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9
Scala	Milán	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.9

La **calidez** de una sala se puede definir como lo hizo Berenek: es la relación entre el tiempo de reverberación en las frecuencias bajas y el tiempo de reverberación en las frecuencias altas:

$$\text{Calidez} = (T_{125-250} / T_{500-1000})$$

Si la sala tiene mucha reverberación en las frecuencias agudas y poca en las graves la sensación que da es de frialdad, es poco cálida. La nitidez de los sonidos depende de estas altas frecuencias pero se necesitan de las bajas para que el sonido sea más redondo y no tenga un carácter metálico.

## 13. CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES

### Clasificación de los instrumentos musicales

Los instrumentos han evolucionado en base a las exigencias de los músicos, capacidades y anatomía de los intérpretes, y preferencias de todos en general; todo esto unido a la habilidad, trabajo y experimentación de los constructores de instrumentos o luthieres.

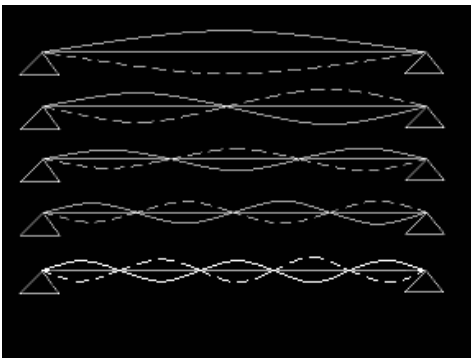
La música compuesta en las diferentes épocas de la historia se ceñía a los instrumentos existentes. Desde hace miles de años existen instrumentos de cuerda punteada y de cuerda frotada. Si nos centramos en la cultura europea se pasa de la cuerda punteada a la frotada en el medioevo y esto hará cambiar la manera de componer las obras que han llegado a nosotros. Los instrumentos de viento no llegan a su pleno desarrollo hasta finales del XIX. Con Brams y Wagner se hace posible el contraste de los conjuntos sonoros aislados de metal, madera y cuerda.

La clasificación de los instrumentos se puede hacer de muy diferentes maneras dependiendo de los criterios que se consideren. El primer criterio para hacer la primera división de los instrumentos en familias tiene en cuenta cuál es el sistema elástico que genera las ondas estacionarias y consigue la altura de tono (cuerda, columna de aire, etc.) y dentro de cada grupo haremos otra subdivisión, con un segundo criterio, que tiene en cuenta cuáles son los mecanismos que ponen en marcha los modos de vibración o resonancias de los sistemas considerados.

El instrumento musical por excelencia más cercano a nosotros es la voz humana. Podemos modular la voz en frecuencia y en amplitud de forma continua. Después de ésta, el ser humano ha experimentado con sonidos producidos básicamente por los siguientes elementos:

1. Cuerdas en tensión.
2. Columnas de aire en tubos (hueso, madera, metal, etc.)
3. Barras, discos, bloques y placas.
4. Pieles en tensión.

### 1. Instrumentos musicales de cuerda



Una cuerda en condiciones normales, libre, no es capaz de generar vibraciones pero si la sometemos a una tensión por los dos extremos tenemos un sistema capaz de generar vibraciones transversales. Si desplazamos la cuerda en tensión de su punto de equilibrio mediante cualquiera de los métodos conocidos (arco, pulsación, percusión, etc.) esta vibrará de unas determinadas maneras. Los modos naturales de vibración son lo que llamamos armónicos de la cuerda, ya que las frecuencias de estos modos de vibración coinciden, casi exactamente, con los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental:  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$ , etc. Vimos en capítulos anteriores como esta frecuencia fundamental depende de la tensión, de la longitud de cuerda vibrante y de la densidad lineal de la cuerda:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho_l}}$$

Los instrumentos de cuerda pueden ser de entonación fija o variable dependiendo de si cada cuerda da una sola altura de tono o varias. En una misma cuerda se pueden conseguir varias alturas de tono modificando la longitud de cuerda vibrante mediante unos trastes colocados en el batidor del instrumento.

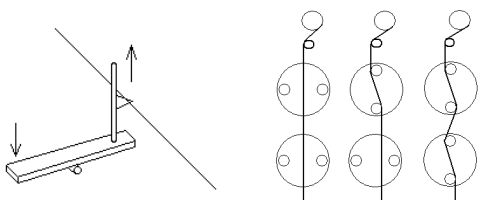
Sobre cuál pudiera ser el primer instrumento de cuerda como tal, todo hace pensar que el arco de caza en manos de un cazador aburrido puede ser considerado como la primera experiencia con cuerda en tensión pulsada. Después llegaría alguna idea feliz sobre la colocación de algún tipo de recipiente o calabaza para amplificar el sonido de esa única cuerda. Con el tiempo llegarían mejoras, otros arcos para frotar la cuerda, más cuerdas, etc. Hace 3000 años en china toda la cultura en general y la cultura musical en particular estaban muy desarrolladas y llevaban ventaja sobre occidente por lo que es probable que las primeras experiencias musicales fueran realizadas allí en oriente y Pitágoras y su grupo tomaran prestados todos esos conocimientos y continuarán experimentando con la base de los armónicos, longitudes de cuerda vibrante, tensiones, etc.

Los orígenes de los instrumentos de entonación variable tampoco están muy claros. Los primeros instrumentos que se conocen en occidente pudieron aparecer en los siglos XIII o IX y pudieron llegar de África. Probablemente sus orígenes sean lejanos tanto en el espacio como en el tiempo. Se puede dar el caso también que un mismo instrumento surja en unos cuantos sitios a la vez.

Una segunda clasificación de los instrumentos de cuerda se puede hacer teniendo en cuenta el modo en el que se ponen en marcha las resonancias de la fuente, que en el caso que nos ocupa es la cuerda. Existen diferentes mecanismos mediante los cuales generamos una vibración: por frotamiento, pulsación o punteo, percusión y también mediante el viento o soplado. El timbre del instrumento cambia mucho si variamos la manera de poner en marcha las resonancias; una guitarra tocada con arco suena "casi" a cello.

**Cuerda frotada:** Las cuerdas se ponen en movimiento al ser frotadas mediante un arco con crines (la cola de caballo es lo más común) gracias al alto rozamiento producido por la resina de la que están impregnadas: VIOLÍN, VIOLA, VIOLONCELLO, CONTRABAJO, VIOLA DE GAMBA, REBAB, RABEL, ETC.

**Cuerda pulsada o punteada:** En este segundo caso la vibración de la cuerda la obtenemos al pulsar o puntear la cuerda con los dedos o con algún material diferente (púas, plectros, etc.) con la mano o mediante un mecanismo accionado desde un teclado: ARPA, BANDURRIA, LAUD, VIHUELA, GUITARRA, CLAVECÍN, CLAVICÉMBALO, MANDOLINA, LIRA, TIORBA, ESPINETA, CÍTARA, SALTERIO, ETC.

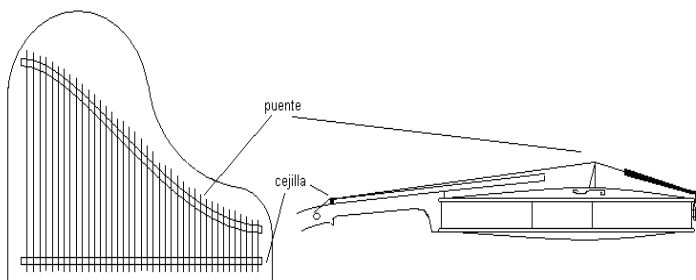


En el arpa se puede aumentar la altura de tono de cada cuerda un semitono o un tono entero para poder ejecutar las obras en cualquier tonalidad. Un pedal situado en la base hace girar unos discos que aprisionan la cuerda disminuyendo su longitud vibrante.

**Cuerda percutada:** En este grupo se consiguen poner en marcha las resonancias de la cuerda al golpear la misma mediante macillos, desde el teclado mediante un mecanismo o con las manos. En algunos casos un mismo instrumento se puede tocar pulsando las cuerdas o golpeándolas con macillos como es el caso de los salterios, dulcimer y alguno más. El material con el que están contruidos los macillos influye en el timbre de los instrumentos.

Existen diferentes nombres para un mismo instrumento en diferentes países e instrumentos diferentes con el mismo nombre por lo que la clasificación es a veces un poco confusa: PIANO, CLAVICORDIO, CÍMBALO, SALTERIO, DULCIMER, ETC.

**Cuerda soplada:** Existe un instrumento poco conocido compuesto por una caja de resonancia y una serie de cuerdas de la misma longitud y diferentes densidades lineales. El instrumento se sitúa en el hueco de una ventana un poco abierta y cuando se crea una corriente de aire las cuerdas comienzan a vibrar. Dependiendo de la intensidad del viento, de la densidad lineal de las cuerdas y de la tensión de las mismas obtendremos diferentes tonos y armónicos. Tal vez no se pueda considerar como un instrumento musical porque ni se hacen melodías con él ni ritmos, tan solo se producen algunos sonidos que pueden gustar más o menos: ARPA EÓLICA.



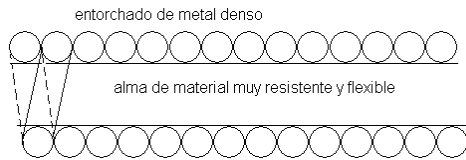
aire y la presión sonora que produce no es suficiente por si sola para poder escucharse, por lo que es necesario el filtro que actúa como amplificador. Este filtro tiene también sus propias resonancias, su capacidad de respuesta a las diferentes frecuencias y es capaz de mover el suficiente aire como para generar una presión sonora considerable (es lo que pretende siempre el luthier) y audible para nosotros a cierta distancia.

Todos los instrumentos de cuerda tienen una disposición muy parecida. Aunque sean muy diferentes constructivamente se pueden simplificar y diferenciar bien las dos partes que componen el instrumento: FUENTE Y FILTRO. Las cuerdas o fuente van dispuestas sobre una caja de resonancia o filtro. Es a esta caja, cuenco o tabla armónica donde llegan las vibraciones de la cuerda, los armónicos. La cuerda tiene resonancias con un factor de calidad muy alto y proporciones armónicas por lo que la altura de tono es muy definida pero tiene poca superficie, mueve poco



El tamaño de este filtro (tabla armónica, caja de resonancia, etc.), construcción, material, geometría, han de adecuarse para que sus resonancias sean capaces de amplificar todo el rango o tesitura que le llega de la fuente (cuerdas).

Una caja pequeña difícilmente podrá amplificar frecuencias bajas, en cambio será un buen filtro para los tonos agudos o altas frecuencias. Las cajas de resonancia grandes serán en principio más adecuadas para amplificar las bajas frecuencias o notas graves de las cuerdas.



Las cuerdas han de tener mucha capacidad para doblarse de lo contrario se empiezan a comportar como una barra y las resonancias no mantienen las proporciones armónicas, con lo que la altura de tono no es tan definida. Para conseguir frecuencias bajas podemos aumentar la longitud vibrante de la cuerda, lo cual no es posible a veces por espacio, o podemos también aumentar la densidad lineal de la cuerda. Entorchar las mismas con metales más o menos densos es una buena idea ya que

## 2. Instrumentos musicales de viento

Se dice que desde tiempos prehistóricos se han utilizado flautas hechas con materiales que presentan forma tubular como un hueso de tibia p.e. con algunos agujeros practicados en el hueso. Los datos que se tienen sobre los primeros instrumentos hacen referencia a la existencia de flautas traveseras hace ya seis milenios.

En los instrumentos de viento los sonidos se producen cuando se induce una vibración en la columna de aire contenida en el tubo. Esta vibración se produce gracias a un flujo de aire que se envía por uno de sus extremos y que interactúa con algún elemento del tubo o añadido a él. Esta perturbación viaja por el interior del tubo reflejándose en los extremos y creando ondas estacionarias. Una de las posibles maneras de clasificar estos instrumentos de viento tiene en cuenta el mecanismo por el cual se generan las vibraciones.

En casi todos los libros aparece un tipo de clasificación que tiene su origen en el barroco cuando se empezaron a perfeccionar estos instrumentos para las orquestas y conjuntos de cámara. Se considera un grupo de Viento-Madera donde se incluyen los instrumentos que antaño se construían en madera (instrumentos de embocadura como flautas, etc. y de lengüeta como clarinetes, oboe, etc.) y otro grupo de Viento-Metal que contiene a los instrumentos que se construían en metal (de boquilla como trompetas, etc.). Esta clasificación hoy en día no es muy acertada ya que existen instrumentos de metal en el grupo de Viento-Madera e instrumentos de madera en el de Viento-Metal.

La clasificación que tendremos en cuenta nosotros considera tres grupos principales: **1.** En los instrumentos de **embocadura** la vibración se genera en un bisel. **2.** En los instrumentos de **lengüeta** la vibración se produce en una o dos lengüetas (efecto Bernoulli) y **3.** en los instrumentos de **boquilla** la vibración se produce en los labios (efecto Bernoulli).

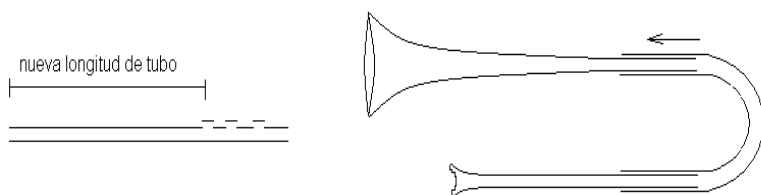
Hay que decir que en los instrumentos de viento que consideramos en esta sección existe una realimentación entre el sistema que genera la vibración y el tubo, un reacoplamiento que se da en los casos en los que las frecuencias de resonancia que tiene el sistema generador por separado (p.e. caña) son mayores que las frecuencias de resonancia del tubo o columna de aire. En otros casos como en la voz o una acordeón pasa lo contrario: las frecuencias de resonancia de las cuerdas vocales o lengüetas son menores que las frecuencias de resonancia del tubo o laringe. Cuando se produce reacoplamiento el sistema generador se amolda y vibra a la misma frecuencia que la columna de aire.

En este tipo de instrumentos de viento nos podemos encontrar con dos tipos de tubos dependiendo de como se comporte la columna de aire en cada extremo:

**Abierto-Abierto:** flauta travesera, flauta dulce, oboe, trompeta, etc. En este tipo de instrumentos la particularidad del extremo donde se genera la vibración hace que se forme un máximo de velocidad al igual que en la zona abierta y en el tubo se producen resonancias que se ajustan a la serie armónica natural como vimos en el capítulo de las resonancias:  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ , etc. que podemos obtener soplando con más fuerza. Con una sola longitud de tubo podemos obtener las primeras notas de la serie armónica natural: un tono fundamental, su  $8^a$ , la  $5^a$  del anterior,  $4^a$ ,  $3M$ ,  $3m$ , etc.

**Cerrado-Abierto:** Tenemos otro tipo de tubo abierto en un extremo y cerrado en el otro: flauta de Pan, clarinete, etc. En el caso de la flauta de pan es fácil ver que un extremo es cerrado y el otro abierto. En los otros instrumentos en uno de los extremos, en la boquilla, se forma un máximo de presión y velocidad nula por el tipo de sistema de boquilla y disposición de la lengüeta. En estos casos en el tubo se forman solamente los armónicos impares por lo que en estos tubos obtenemos el tono fundamental, y soplando más fuerte obtenemos su 12ª, una 6M del anterior, etc.

Hemos visto como de una longitud de tubo determinada podemos obtener unas cuantas notas pertenecientes a la serie armónica natural. Las demás notas las podemos conseguir acortando o aumentando la longitud de tubo.



En el caso de algunos instrumentos de viento como la trompeta o el txistu el primer armónico o fundamental que teóricamente es capaz de dar el tubo no se utiliza. En estos casos el diámetro del tubo es pequeño en relación a su longitud y el fundamental no se forma bien. El primer tono que se utiliza es el segundo armónico y posteriores 5ª, 4ª, 3M, 3m. El

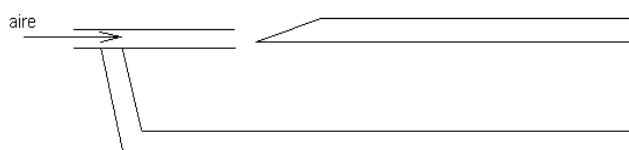
intervalo entre este segundo y tercer armónico es de una 5ª y con tres agujeros nos es suficiente para cubrir el salto y dar las tres notas intermedias.

El cálculo del diámetro y la posición de los agujeros realizados en el tubo es complejo. La frecuencia que da el “nuevo” tubo depende de muchos factores, diámetro del tubo, espesor del mismo, longitud desde el agujero hasta el final, etc. y hay que hacer correcciones para que las cosas funcionen más o menos bien. Las frecuencias de resonancia de estos tubos a veces no se ajustan a la serie armónica natural. En el cálculo de la frecuencia de resonancia hay que hacer una corrección.

La columna de aire también puede quedar perturbada por ensanchamientos y estrechamientos del diámetro interior del tubo. Si se modifica este diámetro los diferentes modos varían la frecuencia de resonancia dependiendo del lugar donde se modifique el diámetro y dependiendo de si se estrecha o se ensancha el tubo. La afinación del txistu se está consiguiendo mediante este método.

**Instrumentos de embocadura:** Las vibraciones se producen en un bisel efectuado en el tubo. La corriente de aire fluctúa y periódicamente sale fuera entra en el tubo creando la perturbación. Estas vibraciones ponen en marcha los diferentes modos de vibración o resonancias del tubo. Si la corriente de aire es suave se excitan los modos de frecuencia más baja y si aumentamos la fuerza, y la velocidad, las perturbaciones son más rápidas y se ponen en marcha las resonancias de frecuencia más alta. La geometría de este bisel también influirá en los armónicos que se generan

Los tubos pueden ser de embocadura directa en los cuales la corriente de aire incide directamente sobre el bisel: FLAUTA DE PAN, FLAUTA TRAVESERA, KENA, etc. y pueden ser también de embocadura indirecta en los cuales la corriente de aire es transportada por un portavento para que incida de forma precisa sobre el bisel: FLAUTA DE PICO, TXISTU, ÓRGANO (algunos tubos), etc.

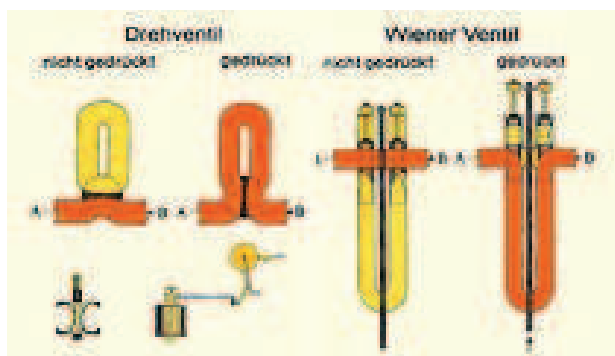


**Instrumentos de lengüeta:** La columna de aire es excitada por una lengüeta flexible generalmente de caña que puede ser simple o doble. Gracias al efecto Bernoulli se produce una depresión en la caña (si soplamos muy fuerte la caña se **pega** a la boquilla) cuando el paso del flujo de aire por la boquilla hace aumentar la velocidad del aire. La elasticidad y flexibilidad de la caña hacen que se produzca la vibración. La caña puede batir sobre una superficie, cuando es simple: CLARINETE, SAXOFON, ALBOKA, ETC. o sobre otra lengüeta, en la doble: OBOE, FAGOT, CORNO INGLÉS, ÓRGANO (otros tubos), etc.



**Instrumentos de boquilla:** En este grupo de instrumentos las vibraciones se producen en los labios de los ejecutantes en contacto con una boquilla situada al principio del tubo. La forma de esta boquilla así como la forma del pabellón final del tubo determinan las características tímbricas de estos instrumentos. El acabado interior del tubo también influye en el timbre.

En estos instrumentos los diferentes tonos se consiguen alargando o acortando la longitud del tubo por medio de mecanismos que hacen pasar el aire por unos tramos añadidos al tubo. La considerable longitud de los tubos hace que sea necesario doblar los mismos para lo cual hemos de tener en cuenta el radio de curvatura que se le da al tubo doblado: ha de ser suficientemente mayor que el diámetro interior del tubo. Podemos encontrar en este grupo al FRIXCORNIO, TUBA, TROMPA, TROMPETA, TROMBÓN DE VARAS, BOMBARDINO, DEEGERIDOO etc.

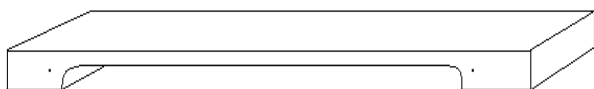


### 3. Instrumentos musicales de barras y placas

Desde siempre se han utilizado objetos como tablas de material rígido y elástico, bloques, etc. siendo golpeados en los diferentes trabajos que ha realizado el ser humano a lo largo de su historia. Dicen que algunos de los ritmos y las danzas surgieron a partir de tareas monótonas y repetitivas realizadas en comunidad. Los diferentes ritmos y danzas tienen a menudo este componente o referencia a una labor. Los ritmos y melodías han evolucionado mucho y están ahora presentes en todos los ámbitos del ser humano: festivo, espiritual, etc.

Los instrumentos que veremos en este apartado están relacionados y considerados todos como instrumentos de percusión hecho que no se ajusta a la utilización que se hace de alguno de ellos. Existen instrumentos que no dan una altura de tono definida y son utilizados básicamente para producir ritmos, pero tenemos otros en este grupo que sí nos dan alturas de tono definidas con los que podemos hacer melodías al igual que con un piano que también es de percusión.

**Placas y barras percutidas:** Los sonidos (que en algunos casos son ruidos) se producen en estos instrumentos al golpear entre sí materiales elásticos rígidos. Una barra, placa o tabla de madera, metal o piedra tiene unos modos de vibración con unas frecuencias de resonancia que no se ajustan a la serie armónica natural por lo que no pueden producir alturas de tono muy definidas. Dependiendo de la relación entre las frecuencias de esos modos tendremos un sonido más o menos agradable que se escucha a veces como un acorde disonante. La experimentación de los constructores hizo evolucionar algunos de estos instrumentos y tenemos hoy en día sistemas, como las tablas de una marimba, que han sido modificados en su geometría de manera que las frecuencias de sus modos de vibración se ajustan a la serie armónica natural:  $f$ ,  $4f$ ,  $10f$ ,... y son capaces de dar sonidos con una altura de tono muy definida. Es el caso de la MARIMBA, XILÓFONO, VIBRÁFONO en los cuales las tablas, una para cada nota, de madera o metal, van situadas sobre un bastidor apoyadas sobre sus puntos nodales y el sonido es amplificado mediante tubos resonadores.



Debajo de cada tabla se sitúa un tubo cerrado-abierto con una frecuencia de resonancia igual a la nota de la tabla que soporta de manera que amplifica el sonido que ésta produce.

Las baquetas o mazos con los que se golpean las tablas son de diversos materiales y se escogen en función del timbre que se quiera obtener. Los materiales más duros, goma o madera, nos darán un timbre metálico y los blandos, generalmente de lana, más dulce y menos brillante. El tiempo de contacto grande de los materiales blandos hace que se pongan en marcha las resonancias más graves, y los materiales duros con tiempos de contacto pequeños ponen en marcha un número mayor de resonancias, más altas en frecuencia, con lo que el timbre es más metálico y brillante.

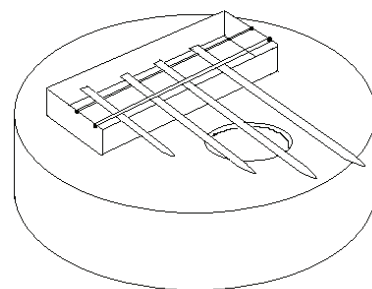
La CELESTA es un instrumento de barras verticales con un teclado incorporado que se ejecuta igual que un piano. Considerar este instrumento en el grupo de los instrumentos de percusión y no considerar al piano también como instrumento de percusión no tiene hoy en día mucho sentido, aun así se hace. Tenemos las CAMPANAS TUBULARES

que no llegan a dar una altura de tono muy definida pero se utilizan para crear melodías con su peculiaridad tímbrica, aunque existe un tipo de campanas chinas que si pueden dar alturas de tono muy definidas.

Existen otros instrumentos que se percuten que no nos dan una altura de tono definida y se utilizan expresamente para producir ritmos como el TRIANGULO, PLATILLOS, CAJA CHINA, CLAVES CUBANAS, CASTAÑUELAS, etc.

**Placas y barras sopladas:** Aunque nos resulte extraño tenemos unos instrumentos muy conocidos que normalmente se han clasificado como instrumentos de viento pero si nos atenemos a los criterios establecidos al principio: 1º qué sistema produce la altura de tono y 2º cómo se ponen en marcha las resonancias, no nos queda más remedio que hacer un hueco a la ACORDEÓN, ARMÓNICA, TRIKITIXA, BANDONEÓN, etc. En estos instrumentos la altura de tono la da una plaquita de metal amarrada en un extremo, barra fija-libre, que ha sido afinada modificando la longitud y los espesores de la placa de manera que las frecuencias de los modos de vibración del sistema se ajusten a la serie armónica natural. En el caso de las acordeones se hace pasar el aire entre la placa y una abertura fina mediante un mecanismo preciso y bien ajustado para conseguir el famoso efecto Bernoulli y conseguir que la placa vibre. En todos estos instrumentos las frecuencias de resonancia de los sistemas generadores de la vibración son menores que las frecuencias de resonancia de los soportes o resonadores donde van situados de modo que no se produce el reacoplamiento producido en otros instrumentos de viento.

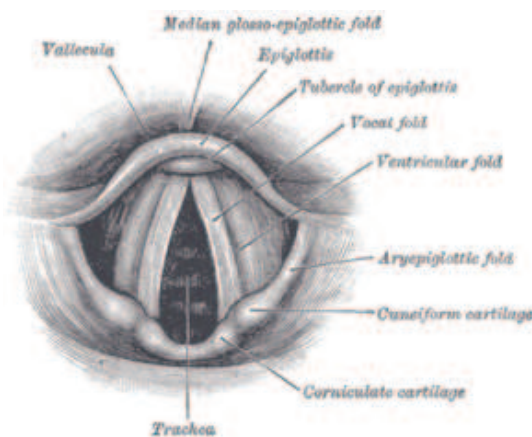
**Placas y barras pulsadas:** Tenemos un pequeño grupo de instrumentos que no por desconocido es menos importante. Una pequeña barra de metal fija en un extremo y libre en el otro se puede afinar ajustando la longitud del extremo de la barra libre. Tenemos la CAJITA DE MÚSICA con su mecanismo de relojería y su cilindro donde cada muesca actúa sobre una nota. La MARÍMBULA es otro representante de este grupo. Consta de varias barras apoyadas y sujetas a un puente unido a una caja de resonancia. El instrumento se ejecuta sosteniéndolo entre las manos y pulsándolo con los dedos pulgares.



**Placas y barras frotadas:** Un poco peculiar es el instrumento que tenemos en este grupo. Un serrucho o plancha metálica frotado con un arco de violín es capaz de dar una nota con una altura de tono que se puede modificar combando el propio serrucho. Una chapa alargada de metal flexible nos puede servir de instrumento musical.

#### 4. Instrumentos musicales de membranas

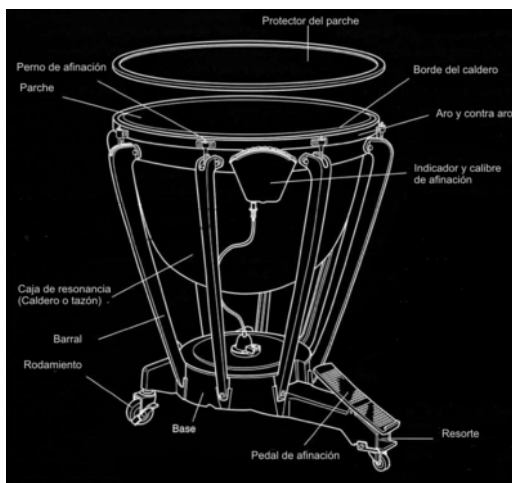
En este curioso grupo tenemos un instrumento muy cercano a nosotros y como hemos dicho antes quizás el más primitivo y el primero de todos. La capacidad de la voz humana de alterar la altura de tono de manera continua y modificar también la sonoridad hacen de él un instrumento musical excelente. Las cuerdas vocales (fuente) son en realidad unas membranas musculares con pinta de cuerdas situadas en la laringe, capaces de producir una altura de tono, que modificamos tensando dicha musculatura. La laringe, boca, lengua, cavidad nasal, labios, etc. (filtro) amplifican y modulan los armónicos que llegan de las cuerdas vocales y definen el timbre característico de cada persona: LA VOZ.



En los demás instrumentos de este grupo el sonido es producido por una membrana en tensión sobre una estructura con forma de cavidad resonante. Originariamente una piel tensa sobre un tronco hueco producía los diferentes "sonidos". Aunque no podamos hablar de una altura de tono definida podemos variar la tensión de la membrana y la forma del hueco del tronco para obtener golpes graves o agudos, "bandas de ruido" diferentes. Antiguamente las membranas eran todas de piel fina. Lo más frecuente y económico hoy en día son los parches o membranas de material sintético, que es más estable a los cambios de temperatura y humedad.

Casi todos los instrumentos de este grupo dan algo más parecido a un ruido que a un sonido, sin altura de tono, por lo que son instrumentos rítmicos: TAMBOR, BOMBO, CAJA, PANDERETA, etc. En el caso del DJEMBE o la DARBOUKA se pueden distinguir dos "sonidos" o bandas de ruido diferentes, uno agudo y otro grave, gracias a la diferente geometría de las dos cavidades diferenciadas que tiene el cuerpo sobre el que se sitúa la membrana.

El TIMBAL es un instrumento de membrana pero con una característica diferente. Gracias a la forma de la cavidad resonante y al acoplamiento que se produce con la membrana se consiguen unas resonancias o modos de vibración en esta membrana con frecuencias que contribuyen a una aceptable altura de tono. Mediante un mecanismo de pedal se tensa y destensa el parche y se consiguen sonidos con una altura de tono bastante definida y su tesitura puede llegar hasta las dos octavas.



## 14. INTRODUCCIÓN A LA ELECTROACÚSTICA

¿Quién no dispone en esta sociedad occidental de un reproductor de música para escuchar una y otra vez esos conciertos que se dieron en el pasado?

### Sistemas mecánicos de almacenamiento de la señal. Comienzo histórico

Sabemos ya que el sonido no es más que una variación periódica de la presión producida por el movimiento de las partículas y moléculas del aire alrededor de su punto de equilibrio y generadas por alguna superficie vibrante. Esta presión sonora se propaga desde la fuente hasta nuestro oído y llega al cerebro donde la vivenciamos.



Una vez que se entiende y conocen los mecanismos de propagación del sonido se comienza a investigar la posibilidad de almacenar este cúmulo de vibraciones que se generan y que se pierden irremediabilmente al de poco tiempo de ser generadas. La idea básica es muy sencilla: almacenar el patrón de vibración para poder reproducirlo en cualquier lugar y momento. Tan solo necesitamos un sistema lo suficientemente sensible como para detectar estas presiones y depresiones en todo su rango de frecuencias.

A lo largo de la historia muchos han sido los intentos con mayor o menor éxito para almacenar los sonidos. El primero del que se tiene conocimiento, el fonógrafo, es puramente mecánico. Consta de un pabellón que recoge las presiones sonoras y las dirige a un pequeño tímpano sensible al cual está pegada una aguja. Esta aguja descansa sobre un rodillo o cilindro, con una capa de cera o material maleable, que se hace girar.



Cuando las presiones y depresiones llegan al tímpano, éste es movido por la fuerza del aire y la aguja acoplada graba un surco sobre el rodillo de cera en movimiento con el "mismo" patrón de vibración que el generado por la fuente. El mecanismo es reversible y podemos hacer girar el rodillo de manera que la aguja se deslice sobre el surco grabado. Las vibraciones son transmitidas al tímpano que genera una presión sonora similar a la vibración del surco y que el pabellón se encarga de amplificar. Posteriormente se desarrolló una nueva forma de almacenar estas vibraciones: un disco plano con un surco espiral. Este formato permitía hacer una sola plancha o matriz original y muchas copias, hecho que no ocurría con el cilindro del que no se podían hacer copias.

Las señales acústicas se graban en el surco del vinilo comprimidas, atenuadas ciertas frecuencias, en alguno de los formatos estándar (p.e. RIAA) que existen en el mercado y que el preamplificador de fono se encarga de "descomprimir". Al principio las grabaciones se hacían en un solo canal, mono, y la grabación en el surco quedaba centrada en el valle. Cuando comenzaron las grabaciones en estereo, dos canales, las cosas se complicaron para los vinilos y se desarrollaron nuevas agujas y métodos de grabación del surco. Los dos canales se graban en las paredes del surco a 90° uno del otro. La aguja apoya sobre las dos paredes y si en una de ellas existe oscilación una bobina situada en la aguja lo captará. Las velocidades de rotación de los discos eran en un principio de 78 rpm, después se bajo a 45 rpm y actualmente algo más de 33 es lo común. Esto se debe a que es más fácil grabar vibraciones de 15.000 Hz si la velocidad de rotación es mayor. La técnica actual permite semejante definición en tan solo velocidades de 33 rpm con lo que se gana en tiempo de duración de la obra grabada en los vinilos.

### Sistemas electromagnéticos de almacenamiento y reproducción

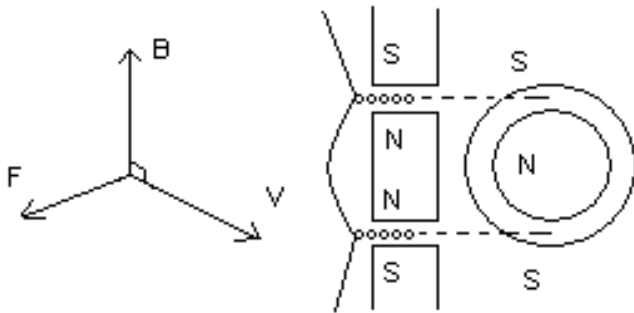
Una vez que se entiende la fenomenología de la acústica nos basta cualquier mecanismo que sea susceptible de moverse frente a variaciones de lo que sea que le llegue para almacenar o reproducir música. Se puede utilizar una característica muy simple de los condensadores. La diferencia de potencial entre las dos placas de un condensador (una placa cargada

positivamente y la otra negativamente) depende de la distancia  $d$  existente entre las placas. Cuando la presión acústica llega a una de ellas, la mueve y hace variar la diferencia de potencial.

Existe otro fenómeno electromagnético descubierto por Faraday que también nos viene bien para este propósito. Cuando una partícula cargada eléctricamente o una corriente eléctrica circula con una velocidad  $V$  a través de un campo magnético  $B$  éste ejerce sobre la partícula una fuerza  $F$  que es máxima cuando la dirección del movimiento es perpendicular a las líneas del campo magnético y nula si la dirección es paralela a las líneas de campo. La fuerza es proporcional a la carga transportada  $q$ .  $\theta$  es el ángulo entre  $V$  y  $B$ .

$$F=qVB\text{sen}\theta.$$

### Transductores acústicos

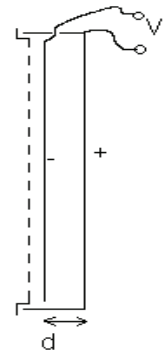


Los transductores acústicos son los sistemas que se encargan de “traducir” las variaciones de presión acústica en señales que pueden ser mecánicas o eléctricas.

Las líneas de campo magnético entre los polos norte y sur de un imán van del polo norte hacia el polo sur. Si construimos un imán circular que tenga el polo norte en el centro y el sur en el exterior las líneas de campo magnético irán del N al S en el entrehierro y si situamos una bobina por la que

circula corriente en este hueco entonces el campo magnético ejercerá una fuerza sobre la bobina y ésta se desplazará hacia el exterior o interior dependiendo de la dirección de la corriente. El proceso es reversible y si una presión acústica llega a la membrana, ésta moverá la bobina en el interior del entrehierro creando una corriente en el circuito de la bobina y la correspondiente señal eléctrica variable. Los micrófonos y altavoces electrodinámicos utilizan este fenómeno electromagnético.

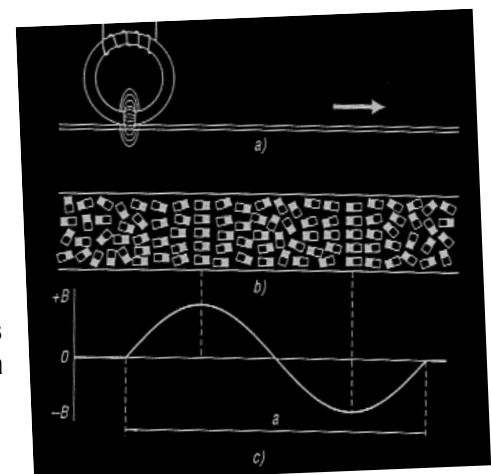
Existen otro tipo de micrófonos y altavoces que utilizan el sistema de condensador descrito en el apartado anterior. Estos sistemas llamados electrostáticos necesitan un voltaje exterior de corriente continua para cargar las dos placas. Podemos recoger y transformar las variaciones de presión que llegan a la membrana del micrófono en variaciones eléctricas, amplificarlas y enviarlas a un altavoz que generará una presión acústica similar a la que llegó al micrófono.



Hoy en día se pueden encontrar en el mercado altavoces de cualquiera de estos dos tipos que reproducen con absoluta fidelidad en todo el rango de frecuencias de la audición (20-20000 Hz) la señal que les llega a través de un amplificador desde un sistema de almacenamiento, vinilo, cinta magnética, CD, etc.

Un fenómeno diferente que se utiliza también para las medidas y la conversión electroacústica es una propiedad que se encuentra en algunos cristales llamados **piezoeléctricos**. Una compresión en estos cristales produce una diferencia de potencial entre las dos caras del cristal. Si sometemos este cristal a una vibración, entonces las aceleraciones y deceleraciones comprimen y descomprimen el cristal, obteniendo así una señal eléctrica con el mismo patrón que la vibración.

El magnetismo que presentan algunos materiales se puede utilizar para almacenar la información recibida por los micrófonos. Las partículas ferromagnéticas que impregnan una cinta magnética de una cassette pueden variar su posición en la cinta dependiendo del campo magnético que exista en el cabezal. La señal acústica llega al micrófono, éste genera la señal eléctrica y se manda amplificada al cabezal que genera el campo magnético variable con el mismo patrón acústico inicial. El campo magnético “moviliza” las partículas que se disponen en la cinta con los mismos patrones de frecuencia e intensidad que la señal que llegó al micrófono. El proceso es reversible y un cabezal puede recoger y transformar en señales eléctricas la información magnética contenida en una cinta,



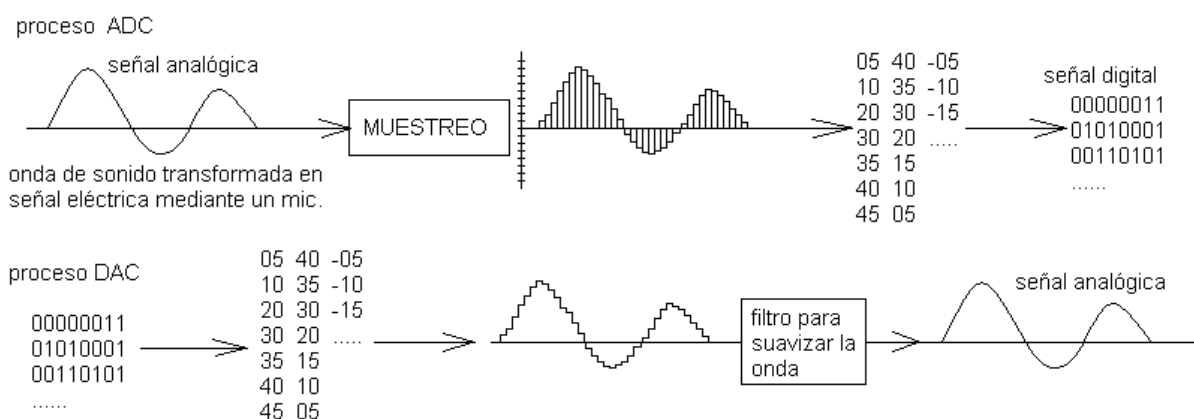
## La era digital. Almacenamiento de datos y convertidores: DAC y ADC

Con la llegada de los ordenadores y su lenguaje binario se produjo una revolución en el mundo de la música, tanto en el ámbito de los instrumentos musicales como en el de la grabación, almacenamiento y reproducción.

Nuestro lenguaje o sistema matemático decimal de uso común tiene diez dígitos o símbolos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9; con ellos contamos y realizamos las operaciones matemáticas. Existen otros sistemas por ejemplo el sexagesimal (tiene implícito el decimal) para contar el tiempo y medir grados, etc. 1 minuto son 60 segundos, 1 hora 60 minutos.

El lenguaje binario, el que nos interesa en este caso, consta de dos dígitos, 0 y 1, que es el que utilizan las máquinas hoy en día porque representa los únicos estados en los que se puede encontrar un circuito eléctrico: hay electricidad o no hay electricidad. Con estos dos dígitos se pueden hacer operaciones matemáticas construir un lenguaje y crear todo lo que hacen actualmente los ordenadores. Si consideramos "palabras" de tres números en el lenguaje decimal podemos contar hasta mil objetos diferentes: 000, 001, 002, ..., 099, 100, ..., 227, 228, 229, ..., 997, 998, 999. En el sistema binario estamos un poco más limitados pero el funcionamiento es similar. Con "palabras" de dos números podemos contar tan solo cuatro objetos: 00, 01, 10, 11. Con palabras de tres números contamos hasta ocho: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. En la digitalización de la música se utilizan palabras de 8 o 16 números o bits con los que podemos contar respectivamente 256 y 65536 objetos o niveles diferentes de la señal. Es evidente que si utilizamos 16 bits el muestreo que hagamos se parecerá más a la realidad ya que podemos dividir los diferentes niveles de voltaje en más de 65000 partes. Con 24 bits tendremos más definición en los niveles de presión sonora digitalizados.

El proceso que sigue la señal se explica en el siguiente esquema: Analogic Digital Converter y Digital Analogic Converter



La señal de sonido -las variaciones de presión- es recogida por un micrófono que la convierte en una señal analógica eléctrica. El convertidor Analógico-Digital o ADC muestrea la señal unas 40000 veces por segundo (44.1 kHz en el caso del CD pero existe muestreos de mayor frecuencia y precisión 92.5 kHz) y se cuantifica utilizando los 65536 niveles que nos permiten las palabras de 16 bits. Esta información en forma de ceros y unos se puede almacenar en diferentes formatos. En el caso del CD en la pista metálica se graban surcos cortos y largos que el láser identifica como 0 ó 1.

El convertidor Digital-Analógico, DAC, es la máquina que recibe los ceros y unos y los transforma en una señal eléctrica analógica casi igual a la que teníamos al principio. Después esta señal se envía al amplificador y de aquí a los altavoces.

Toda esta información digital se puede manipular y manejar con mucha facilidad. Los programas de ordenador de hoy en día son capaces de editar partituras, generar sonidos electrónicamente, simular sonidos de instrumentos reales, cortar, pegar, editar canciones, añadir reverberación y efectos diversos, y un largo etc. tan solo manejando ceros y unos.

Los sistemas de almacenamiento de datos ya no son un problema y la resolución obtenida con las frecuencias de muestreo y la cuantificación es cada vez mayor. La reproducción de música con los formatos digitales se puede decir que es casi parecida a la realidad.