

Acústica Musical

*La **acústica musical** estudia no solo el comportamiento de los instrumentos musicales (tanto acústicos como electroacústicos), sino también la relación entre los **distintos sonidos** para dar origen a sensaciones musicales significativas como la percepción de una **escala musical**, la sensación de **consonancia** y **disonancia**, los diferenciación **tímbrica**, etc.*

Consonancia y disonancia

Al **superponer** dos sonidos de frecuencias muy próximas entre si tiene lugar un fenómeno de **batido** o **pulsación** entre ambos, consistente en una fluctuación periódica de la **amplitud**. Por ejemplo, si superponemos dos tonos puros de **700Hz** y **800Hz** e igualdad de amplitud, se tiene una situación ilustrada en la Fig. Al sumarlos, en tiempo 0, ambos están **en fase** por consiguiente la amplitud se **suma**. A medida que pasa el tiempo, debido a la diferencia de frecuencia las dos sinusoides se van **desfasando**, y hacia los 5ms el octavo período de **800 Hz** y el séptimo de la de **700Hz** están prácticamente en **contratase**, razón por la cual el resultado es casi **nulo**. Hacia los 10 ms vuelven a estar en **fase**, por lo que la amplitud vuelve a ser el **doblo**. Lo que se obtiene es un sonido **modulado** por una envolvente que se repite cada 10ms, es decir que tiene una frecuencia de **100Hz** ($F = 1/T \dots 1 / 0,01s = 100Hz$). Obsérvese que esta frecuencia es la **diferencia** entre la dos frecuencia superpuestas:

$$100Hz = 800Hz - 700Hz$$

El resultado anterior se puede generalizar. Si se superponen (suman) dos sonidos de frecuencia f_1 y f_2 ($f_1 \gg f_2$) entonces aparecerán pulsaciones de frecuencia $f_1 - f_2$. Si la diferencia de frecuencia es **muy pequeña**, entonces las pulsaciones serán muy lentas y no se percibirán como una pulsación sino como una **suave envolvente**. Por ejemplo, si las frecuencias son **440 Hz** y **442Hz**, la diferencia es **0,1Hz** es decir una pulsación cada **10s**. En este caso, dado que

la gran mayoría de las notas usadas en música son mucho más cortas que 10s, no se llegará a percibir la pulsación completa sino más bien un sonido más **cantado** o más **expresivo**. Este es uno de los efectos que se aprecian al escuchar una orquesta de cámara, ya que todos los instrumentos sufren siempre **micro desafinaciones**.

Si las pulsaciones son un poco más rápidas, por ejemplo **1** o **2 Hz**, se percibe un efecto llamado **Trémolo**, semejante a las notas repetidas. Si son más rápidas (5 hasta 50Hz), el resultado es una sensación llamada **disonancia**.

El efecto batido analizado anteriormente suponía que los sonidos eran **tonos puros** (senoidales). Si en lugar de ello se tienen dos sonidos **complejos** (formados por cierta cantidad de armónicos) comúnmente utilizados en música, es posible que se produzcan batidos entre los **armónicos**.

Supongamos por ejemplo, **un acorde** (más de una nota ejecutada al mismo tiempo) formado por dos sonidos de **220Hz** y **311Hz** (un **LA** y un **RE#** respectivamente). Es sabido que en música dicho acorde resulta **disonante**. Si efectuamos la **resta** entre ambas frecuencias obtenemos:

$$311\text{Hz} - 220\text{Hz} = 91\text{Hz}$$

que es un batido **demasiado rápido** para provocar la sensación de disonancia que son respectivamente **220Hz**, **440Hz**, **660Hz...** y **311Hz**, **622Hz**, **933Hz...**, resulta que el tercer armónico de **220Hz** (660Hz) interfiere con el segundo de **311Hz** (622Hz) causando pulsaciones de frecuencia:

$$660\text{Hz} - 622\text{Hz} = 38\text{Hz}$$

dando una clara sensación de **disonancia**.

Nos preguntamos entonces cuando dos sonidos forman un acorde **consonante**. La condición para este es que no exista interferencia **entre armónicos** importantes, es decir intensos de ambos sonidos. Así, tenemos que la consonancia más perfecta es el **unísono** (frecuencias exactamente iguales, ya que en ese caso no hay pulsaciones en absoluto). Luego sigue la **octava**, es decir cuando dos sonidos siguen una relación de **2:1** (un sonido tiene el doble de frecuencia que el otro). Aquí tampoco hay posibilidad de **choques** entre armónicos porque los armónicos del más agudos **coinciden** exactamente con los del más grave. Luego sigue la **quinta**, que corresponde a una relación en frecuencia de **3:2** (uno de los sonidos tiene frecuencia 1,5 veces la del otro). Tomemos por ejemplo la quinta formada por el **LA** de 220Hz y el **MI** de 330Hz. En este caso los armónicos sucesivos, mostrados en la Fig., **difieren** en 110Hz o más. El mismo tipo de análisis muestra que las siguientes consonancias son, en orden de **perfección**, las que corresponden a pares de sonidos con relaciones de frecuencias de **4:3** (cuarta), **5:4** (tercera mayor), **6:5** (tercera menor), **5:3** (sexta mayor) y **8:5** (sexta menor).

Escalas Musicales

Las escalas musicales surgen históricamente de la necesidad de satisfacer tres principios: **Economía**, **reproducibilidad** y **funcionalidad**:

Economía: De todos los sonidos disponibles (es decir audibles) deben seleccionarse la **menor** cantidad posible. Una razón es que la mayoría de los

instrumentos permiten realizar solo una cantidad relativamente **pequeña** de sonidos. Algunas excepciones son la **voz humana**, los instrumentos de **arco** (violín, viola, etc.) y el trombón de vara. En el caso de música grupal, la combinación de diferentes instrumentos logra la **mayor** variedad de sonidos con la **mayor** simplicidad.

Reproducibilidad: Los sonidos seleccionados deben ser **fácilmente** reproducibles, tanto vocal como instrumentalmente. Cuando se habla de "reproducibles" significa que debe ser fácil lograr una **afinación** suficientemente precisa como para no alterar el modo apreciable del sentido de lo que se ejecuta o canta.

Funcionalidad: La escala adoptada debe satisfacer los criterios estéticos correspondientes al uso que se le va a dar. Por ejemplo si el uso será **armónico** (es decir que se emplearán combinaciones simultáneas de sonidos), entonces la mayor cantidad posible de **superposiciones** entre sonidos de la escala deberán resultar aceptables o "**agradables**" de acuerdo al estilo armónico que se va a practicar. Esto implica que al adoptar esta escala se deben tener en cuenta cuestiones como el gusto y otros aspectos.

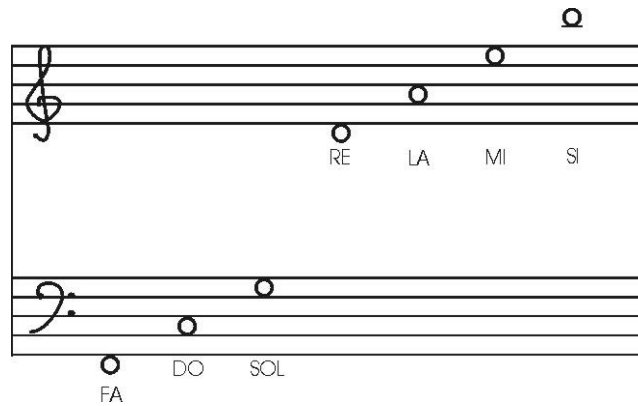
Escalas para uso monofónico

En este caso, que corresponde a las músicas **mas primitivas**, sólo aparece un sonido por vez. Corresponde al canto o a los instrumentos monofónicos como la flauta, etc. El principio de funcionalidad en este caso no implica ninguna restricción. El principio de reproducibilidad requiere casi exclusivamente **la memoria**, ya que los sonidos sucesivos deben ser fácilmente memorizables.

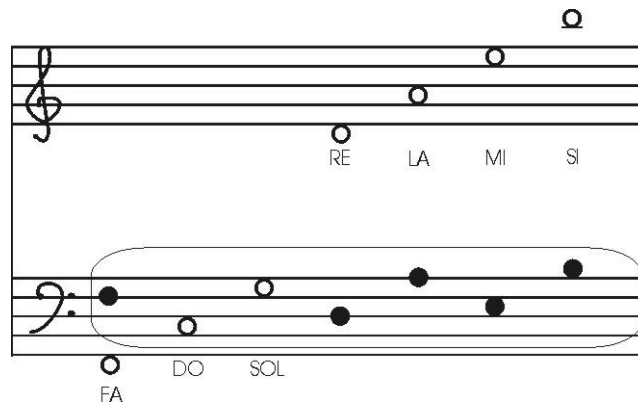
El criterio básico será que existan **armónicos comunes** entre todos los sonidos mas importantes de la escala, ya que de esta manera éstos actúan como "**pivotes**" entre ambos, permitiendo una transición segura, es decir con buena afinación, entre ellos.

El intervalo más fácil de memorizar es el **unísono** (igual frecuencia), ya que corresponde a una repetición exacta de la altura anterior. Luego sigue la **octava**, ya que la octava de un sonido equivale a su **segundo** armónico. Después sigue la **quinta**, cuyo **segundo** armónico coincide con el **tercero** de la nota original. Podríamos seguir investigando los intervalos básicos, pero dado que los armónicos superiores al tercero son en general **poco intensos**, no resulta muy seguro basarse en la memoria de armónicos difíciles de escuchar.

Se utiliza en realidad otro criterio, que es el encadenamiento de **quintas** y de **octavas**, es decir que partiendo de un sonido, se toma primero su quinta, luego la quinta de la quinta y así sucesivamente, se toman siete sonidos, que en notación musical son:



Luego se sube o se baja la cantidad de octavas que haga falta para que todos los sonidos se encuentren dentro de una misma octava. Así, el **LA** se sube una octava, el **DO** y el **SOL** no se modifican el **RE** y el **LA** se bajan una octava, y el **MI** y el **SI** se bajan dos octavas. Se obtiene así la escala recuadrada entre puntos:



El último paso sería reordenar las notas de modo que sus frecuencias vayan en aumento. La escala así obtenida se llama escala de Pitágoras o escala Pitagórica, ya que el célebre filósofo y matemático fue quien la sistematizó.

• Escalas de uso Polifónico o armónico

En un estadio mas avanzado de la evolución de la música surge la necesidad de combinar sonidos **simultáneos**. Al intentar varias personas cantar una misma melodía. Entre cantantes de igual tesitura vocal era posible cantar al unísono (igual altura). Pero por ejemplo, entre las voces masculinas y las femeninas hay una diferencia promedio de **una octava**, de modo que el primer intervalo de uso simultáneo (además del caso trivial del unísono) fue **la octava** (relación en frecuencia 2:1). Luego fueron sugiriendo otros intervalos como **la quinta** (3:2) y **la cuarta** (4:3), y posteriormente surgió la polifonía, en la cual se superponían diferentes melodías, formando en cada instante diversos intervalos simultáneos.

El principio de funcionalidad válido para ésta aplicación requiere que la **mayor** cantidad posible de superposiciones de sonidos de la escala que se adopte resulte "agradable", concepto desde luego muy "relativo". En la época en que

se consolidaron las escalas sobre las que se basan las de hoy en uso, el criterio era el de **consonancia**.

Las consonancias disponibles son en orden **decreciente de perfección** las indicadas en la tabla (dicho orden coincide aproximadamente con el orden histórico en que fueron siendo aceptadas en la evolución de la música). En una música polifónica desarrollada, es de esperar que cada una de estas consonancias aparezca con frecuencia, por lo que es preciso elegir los sonidos de la escala de manera de logran la mayor cantidad posibles de **superposiciones consonantes**. En la escala de Pitágoras, las octavas y las quintas y las cuartas son **acústicamente perfectas**, pero las terceras y las sextas no. Si tomamos por ejemplo, el intervalo entre un DO y un MI Pitagórico, que parecería ser una tercera mayor, resulta la siguiente relación de frecuencias:

$$f_{MI}/f_{DO} = 3/2 \cdot 3/2 \cdot 3/2 \cdot 3/2 \cdot 1/2 \cdot 1/2 = 81/64$$

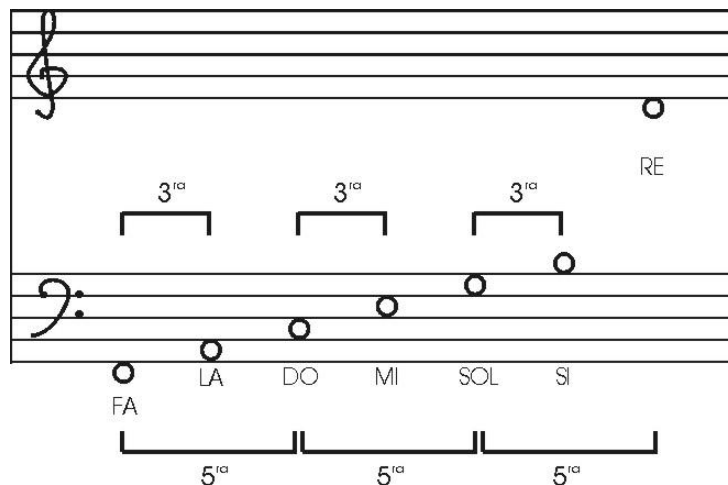
Donde los primeros factores 3/2 corresponden al encadenamiento de **cuatro quintas** desde el DO hasta el MI agudo, y los factores 1/2 corresponden a bajar dos octavas.

Vemos que el resultado difiere de una tercera mayor, acústicamente perfecta, a la cual correspondería una relación de 5/4, es decir:

$$5/4 = 80/64 = 81/64$$

La diferencia correspondiente a la relación 81/64 se denomina como pitagórica, y es un pequeño intervalo de 1/10 de tono. Esta diferencia es claramente perceptible, produciendo una consonancia no tan perfecta como el intervalo perfecto.

Este inconveniente se origina en que para la construcción de la escala pitagórica no se utilizaron terceras perfectas. Para subsanarlo, en lugar de generar la escala por encadenamientos de 6 quintas, solo se utilizan 3 quintas, lo cual origina 4 notas. Las tres netas que faltan se logran tomando las terceras mayores perfectas sobre las tres primeras notas:



Luego se procede igual que en la escala de Pitágoras, subiendo o bajando la cantidad de octavas que haga falta para que todos los sonidos se encuadren dentro de una misma octava. Así el fa y el la se suben una octava y el re se baja una octava. Finalmente se reordenan. Esta escala es denominada escala natural, escala perfecta o escala de Aristógenes.