



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

UNIDAD CULHUACAN

Acústica Musical

Tesina

Que para obtener el título de Ingeniero en
Comunicaciones y Electrónica

Presenta

Israel Cerón Monroy

Mario Iván Cucue Sánchez de la Barquera

Asesores

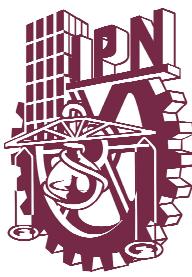
Ing. Luís Gerardo Hernández Sucilla

Ing. Jorge Antonio Cruz Calleja



México, D.F.

Octubre 2008



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y
ELECTRICA UNIDAD CULHUACAN**



QUE GENERA EL TITULO: INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA

POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN: SEMINARIO

DENOMINADO:

TECNICAS DE GRABACIÓN Y REPRODUCCIÓN DEL SONIDO
VIGENCIA: FNS30697/12/2007

DEBERA DE REALIZAR:

CERÓN MONROY ISRAEL
SÁNCHEZ DE LA BARQUERA MARIO IVÁN CUCUE

“ACÚSTICA MUSICAL”

CAPITULO 1.
CAPITULO 2.
CAPITULO 3.
CAPITULO 4.
CAPITULO 5.
CAPITULO 6.
CAPITULO 7.
CAPITULO 8.
CAPITULO 9.
CAPITULO 10.
CAPITULO 11.

INTRODUCCIÓN
CONCEPTOS BASICOS DE SONIDO
DESARROLLO DE PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN
LAS ESCALAS MUSICALES
LOS INSTRUMENTOS MUSICALES
CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES
CONFIGURACIÓN DE INSTRUMENTOS EN UNA ORQUESTA
PROYECTO “DICIONARIO MÚSICO-INGENIERO”
CONCLUSIONES
REFERENCIAS
GLOSSARIO

ASESORES

ING. LUIS GERARDO HERNANDEZ SUCILLA

ING. JORGE ANTONIO CRUZ CALLEJA

ING. IGNACIO MONROY OSTRIA

JEFE DE LA CARRERA DE INGENIERIA EN COMUNICACIONES Y ELECTRONICA

INDICE

1. Introducción	5
2. Conceptos básicos sobre el sonido	7
2.1 El Sonido	7
2.2 Cualidades del sonido	9
2.3 Evolución temporal de un sonido	12
2.4 Ondas estacionarias y resonancia	14
3. Desarrollo de proyecto	17
4. Las Escalas Musicales	18
4.1 Introducción	18
4.2 El origen de la escala musical	19
4.3 El nombre de las notas musicales	23
4.4 La Escala Natural	26
4.5 La Escala Pentatónica	27
4.6 La Escala Diatónica	28
4.7 La Escala Cromática o Temperada	29
5. Los Instrumentos Musicales	32
5.1 Origen de los Instrumentos Musicales	32
5.2 Introducción a los Instrumentos Musicales	33
6. Clasificación de los Instrumentos Musicales	34
6.1 Los Instrumentos de Cuerda	39

6.1.1 Introducción a los Instrumentos de Cuerda	39
6.1.2 Principios de Funcionamiento de los Instrumentos de Cuerda	40
6.1.3 Clasificación de los Instrumentos de Cuerda	41
6.2 Los Instrumentos de Viento	56
6.2.1 Introducción a los Instrumentos de Viento	56
6.2.2 Principios de Funcionamiento de los Instrumentos de Viento	57
6.2.3 Clasificación de los Instrumentos de Viento	67
6.3 Los Instrumentos de Percusión	77
6.3.1 Introducción a los Instrumentos de Percusión	77
6.3.2 Principios de Funcionamiento de los Instrumentos de Percusión	77
6.3.3 Clasificación de los Instrumentos de Percusión	82
7. Configuración de los instrumentos musicales de una Orquesta	91
8. Proyecto “Diccionario Músico-Ingeniero”	94
9. Conclusiones	109
10. Referencias	110
11.Glosario	111

1. Introducción

En la antigüedad, filósofos griegos como Aristóteles (384-322 AC) y Chrysippus (240 AC) comenzaron a teorizar acerca de la naturaleza del sonido. En 1657 Gaspare P. Schotto en su libro "Magiae Universalis" publicado en Herbipoli, actual Wurzburg (Alemania), describió ejemplos de análisis de ondas sonoras así como su generación mediante instrumentos basados en agua.

El comienzo del estudio científico de las ondas acústicas se suele atribuir al francés Marin Mersenne (1988-1648), considerado el padre de la acústica, y a Galileo Galilei (1564-1642) con su "Discursos Matemáticos concernientes a dos nuevas ciencias" (1638).

Isaac Newton (1642-1727) desarrolló la teoría matemática de la propagación del sonido en su "Principia" en 1686. Luego, habrían de transcurrir muchos años hasta que, en el siglo XIX, los trabajos realizados por Stokes, Thomson, Lamb, König, Tyndall, Kundt y otros precedieron el importante desarrollo de Helmholtz en su "Teoría fisiológica de la música" en 1868 para luego llegar al gran tratado de dos volúmenes de Lord Rayleigh "Teoría del Sonido" en 1877 y 1878.

También cabe destacar el enorme aporte de los laboratorios BELL a la Acústica, Electroacústica y Psicoacústica durante la primera mitad de este siglo.

Una posible definición de Acústica podría ser la siguiente: la acústica es la ciencia que estudia la producción, transmisión y percepción del sonido tanto en el intervalo de la audición humana como en las frecuencias ultrasónicas e infrasónicas.

Dada la variedad de situaciones donde el sonido es de gran importancia, son muchas las áreas de interés para su estudio: voz, música, grabación y reproducción de sonido, telefonía, refuerzo acústico, audiología, acústica arquitectónica, control de ruido, acústica submarina, aplicaciones médicas, etc. Por su naturaleza constituye una ciencia multidisciplinaria ya que sus aplicaciones abarcan un amplio espectro de posibilidades, tal como se observa en la siguiente figura:

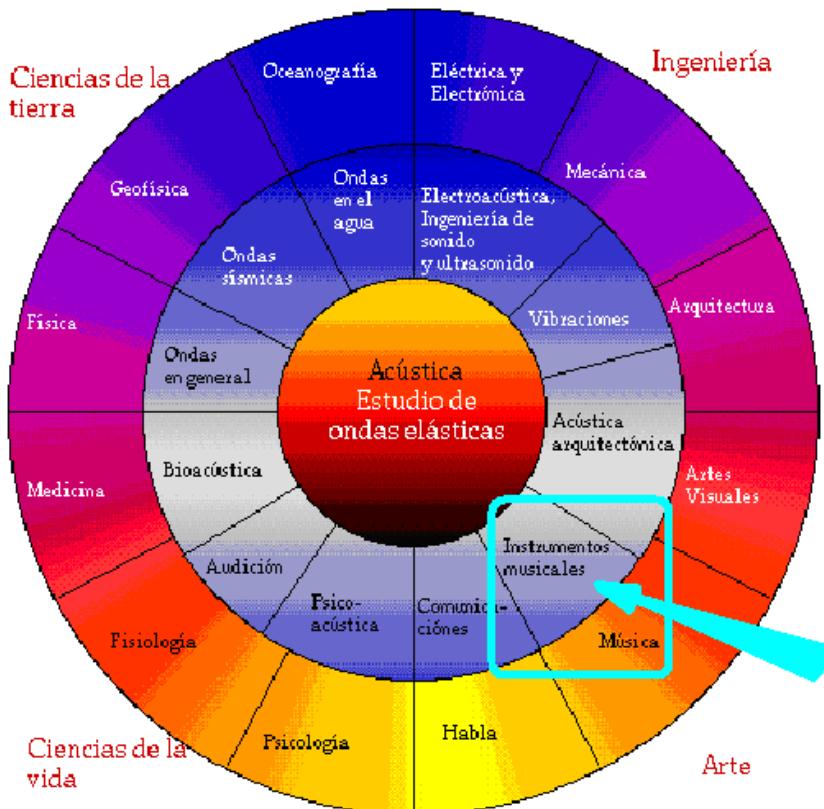


Figura 1: Fuente, R.B. Lindsay "Journal of Acoustical Society of America", 1964.

Se define como Acústica Musical a aquella parte de la ciencia acústica que trata del estudio de las relaciones entre esta ciencia y el arte musical. Se ocupa particularmente de los principios de las distintas teorías musicales, de los problemas sonoros y de la constitución y funcionamiento de los instrumentos musicales (organología), del uso de los sistemas de grabación, de la modificación electrónica de la música y el estudio de su percepción, entre otros.

Las relaciones entre el arte musical y la ciencia acústica se han estrechado de tal forma, que es imprescindible que, por una parte el músico conozca las leyes que rigen los principios físicos por los que se rige la música, y por otra parte, el físico acústico que desarrolla su profesión en relación con el arte musical, disponga de los conocimientos necesarios como para poder desarrollar con éxito su trabajo. Es por eso que la teoría de este arte debe comenzar por el estudio del hecho sonoro y de las diversas formas de su producción.

2. Conceptos básicos sobre el sonido

2.1 El sonido

Desde un punto de vista físico, el sonido es una vibración que se propaga en un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso), generalmente el aire. Otra definición para el sonido podría ser: es la sensación producida en el oído por la vibración de las partículas que se desplazan (en forma de onda sonora) a través de un medio elástico que las propaga.

Para que se produzca un sonido se requiere la existencia de un cuerpo vibrante llamado "foco" (una cuerda tensa, una varilla, una lengüeta...) y del medio elástico transmisor de esas vibraciones, las cuales se propagan a su través constituyendo la onda sonora.

Esta imagen demuestra cómo se transmiten las ondas sonoras, y nos permiten comprender que cuando un foco vibra en el aire, "obliga" a que las partículas de ese medio entren a su vez en vibración, siempre con cierto retraso con respecto a las anteriores. Su avance se traduce en una serie de compresiones y dilataciones. Debido a que estas compresiones y dilataciones avanzan con la onda, podemos afirmar que una onda sonora es una onda de presión.

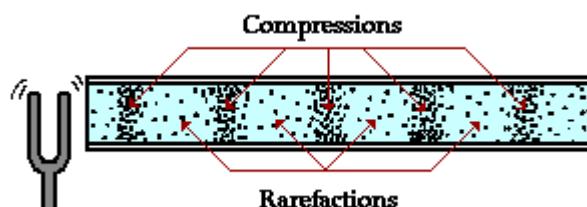


Figura 2: Compresión y Rarefacción

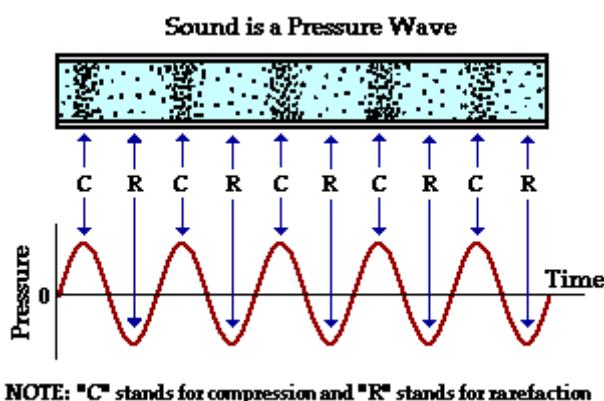


Figura 3: Comportamiento de la onda sonora

Como onda, el sonido responde a las siguientes características:

a) Es una onda mecánica

Las ondas mecánicas no pueden desplazarse en el vacío, necesitan hacerlo a través de un medio material (aire, agua, cuerpo sólido).

Además, de que exista un medio material, se requiere que éste sea elástico. Un medio rígido no permite la transmisión del sonido, porque no permite las vibraciones.

La propagación de la perturbación se produce por la compresión y expansión del medio por el que se propagan. La elasticidad del medio permite que cada partícula transmita la perturbación a la partícula adyacente, dando origen a un movimiento en cadena.

b) Es una onda longitudinal

El movimiento de las partículas que transporta la onda se desplaza en la misma dirección de propagación de la onda.

c) Es una onda esférica

Las ondas sonoras son ondas tridimensionales, es decir, se desplazan en tres direcciones y sus frentes de ondas son esferas radiales que salen de la fuente de perturbación en todas las direcciones. El principio de Huygens afirma que cada uno de los puntos de un frente de ondas esféricas puede ser considerado como un nuevo foco emisor de ondas secundarias también esféricas, que como la originaria, avanzarán en el sentido de la perturbación con la misma velocidad y frecuencia que la onda primaria.

2.2 Cualidades del Sonido

Cualquier sonido sencillo, como una nota musical, puede describirse en su totalidad especificando tres características de su percepción: el tono, la intensidad y el timbre. Estas características corresponden exactamente a tres características físicas: la frecuencia, la amplitud y la composición armónica o forma de onda.

Existe una distinción entre un sonido agradable y el ruido. Un sonido agradable está producido por vibraciones regulares y periódicas. En cambio, el ruido es un sonido complejo, una mezcla de diferentes frecuencias o notas sin relación armónica que dan una sensación confusa, sin entonación determinada.

La altura o tono

Los sonidos musicales son producidos por algunos procesos físicos como por ejemplo, una cuerda vibrando, el aire en el interior de un instrumento de viento, etc. La característica más fundamental de esos sonidos es su "elevación" o "altura", o cantidad de veces que vibra por segundo, es decir, su frecuencia. Cuanto mayor sea su frecuencia, más aguda o "alta" será la nota musical. La altura es una propiedad subjetiva de un sonido por la que puede compararse con otro en términos de "alto o "bajo". Los sonidos de mayor o menor frecuencia se denominan respectivamente, agudos o graves; términos relativos, ya que entre los tonos diferentes uno de ellos será siempre más agudo que el otro y a la inversa.

Mientras que la frecuencia de un sonido, es una definición física cuantitativa, que se puede medir con aparatos sin una referencia auditiva, la elevación es nuestra evaluación subjetiva de la frecuencia del sonido. La percepción puede ser diferente en distintas situaciones, así para una frecuencia específica no siempre tendremos la misma elevación.

La frecuencia de las vibraciones de instrumentos de un mismo tipo es proporcional a sus dimensiones lineales.

La intensidad

La distancia a la que se puede oír un sonido depende de su intensidad, que es el flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de ondas esféricas que se propagan desde una fuente puntual, la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, suponiendo que no se produzca ninguna pérdida de energía debido a la viscosidad, la conducción térmica u otros efectos de absorción. Por ejemplo, en un medio perfectamente homogéneo, un sonido será nueve veces más intenso a una distancia de 100 metros que a una distancia de 300 metros. En la propagación real del sonido en la atmósfera, los cambios de propiedades físicas del aire como la temperatura, presión o humedad producen la amortiguación y dispersión de las ondas sonoras, por lo que generalmente la ley del inverso del cuadrado no se puede aplicar a las medidas directas de la intensidad del sonido.

El timbre

Si el tono permite diferenciar unos sonidos de otros por su frecuencia, y la intensidad los sonidos fuertes de los débiles, el timbre completa las posibilidades de variedades del arte musical desde el punto de vista acústico, porque es la cualidad que permite distinguir los sonidos producidos por los diferentes instrumentos. Más concretamente, el timbre o forma de onda es la característica que nos permitirá distinguir una nota de la misma frecuencia e intensidad producida por instrumentos diferentes. La forma de onda viene determinada por los armónicos, que son una serie de vibraciones subsidiarias que acompañan a una vibración primaria o fundamental del movimiento ondulatorio (especialmente en los instrumentos musicales).

Normalmente, al hacer vibrar un cuerpo, no obtenemos un sonido puro, sino un sonido compuesto de sonidos de diferentes frecuencias. A estos se les llama armónicos. La frecuencia de los armónicos, siempre es un múltiplo de la frecuencia más baja llamada frecuencia fundamental o primer armónico. A medida que las frecuencias son más altas, los segmentos en vibración son más cortos y los tonos musicales están más próximos los unos de los otros.

Si se toca el La situado sobre el Do central en un violín, un piano y un diapasón, con la misma intensidad en los tres casos, los sonidos son idénticos en frecuencia y amplitud, pero muy diferentes en timbre. De las tres fuentes, el diapasón es el que produce el tono más sencillo, que en este caso está formado casi exclusivamente por vibraciones con frecuencias de 440 Hz. Debido a las propiedades acústicas del oído y las propiedades de resonancia de su membrana vibrante, es dudoso que un tono puro llegue al mecanismo interno del oído sin sufrir cambios. La componente principal de la nota producida por el piano o el violín también tiene una frecuencia de 440 Hz. Sin embargo, esas notas también contienen componentes con frecuencias que son múltiplos exactos de 440 Hz, los llamados tonos secundarios, como 880, 1.320 o 1.760 Hz. Las intensidades concretas de esas otras componentes, los llamados armónicos, determinan el timbre de la nota.

Los armónicos contribuyen a la percepción auditiva de la calidad de sonido o timbre. A continuación veremos algunos ejemplos de sonidos con formas de onda diferentes.

Para entender mejor cómo se descompone un sonido en diferentes armónicos, resulta fundamental entender el Análisis de Fourier o análisis armónico, tan estudiado en los cursos de ingeniería:

Gracias al teorema de Fourier, desarrollado por el matemático francés Fourier (1807-1822) y completado por el matemático alemán Dirichlet (1829), es posible demostrar que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier período, puede desarrollarse como una combinación de senos y cosenos (armónicos).

Desde el punto de vista de la física, significa, que una oscilación que no es armónica se puede representar como una combinación de oscilaciones armónicas, cada una con su propia amplitud, frecuencia y fase. El armónico fundamental es el de frecuencia más baja. Las frecuencias de los demás armónicos serán múltiplos de esta. Además la periodicidad de la oscilación estará dada por el período del armónico fundamental.

A continuación se muestra la descomposiciónpectral de algunos instrumentos musicales:

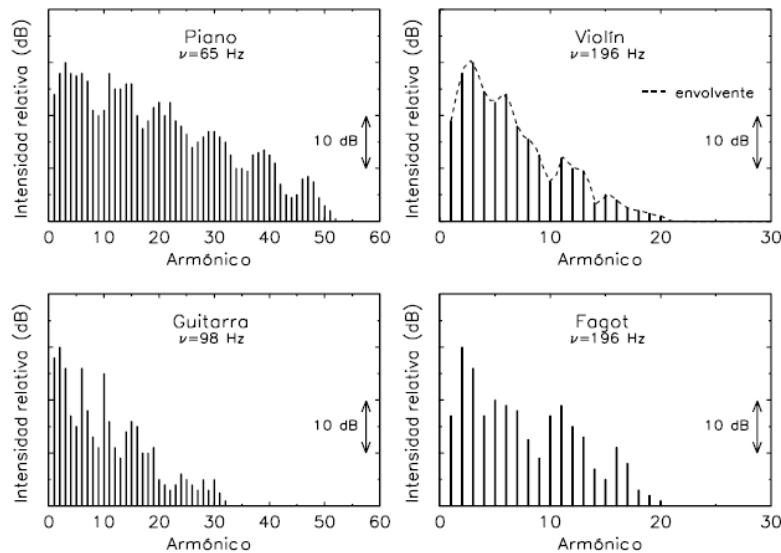


Figura 4: Descomposiciónespectral

Con esto vemos que la superposición de sonidos diferentes da lugar a sonidos más ricos. De cualquier forma, mientras los sonidos producidos por instrumentos musicales se construyen a partir de una nota fundamental y otras de frecuencia múltiple, como todos sabemos, existen sonidos que no son tan armoniosos entre sí; son a estos sonidos a los que llamamos comúnmente: ruido.

2.3 Evolución temporal de un sonido

Evolución temporal de la intensidad

El otro aspecto de un sonido que participa en la conformación de su timbre es la variación temporal de su intensidad.

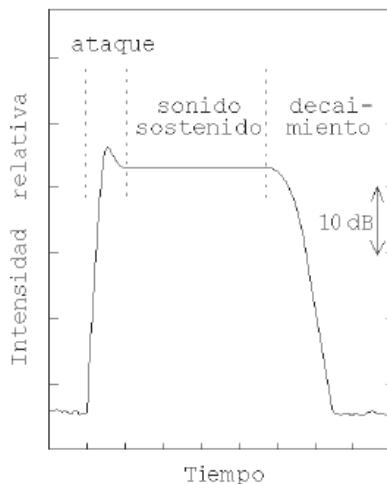


Figura 5: Se muestra esquemáticamente una evolución temporal típica de un sonido.

En los instrumentos de viento los distintos armónicos no aparecen por arte de magia. Sólo después de muchas idas y venidas del sonido a lo largo de la columna de aire que existe en el interior del instrumento se presentan y se refuerzan los armónicos que terminamos por escuchar. Por esto, el sonido precursor puede ser bastante distinto al que finalmente llegará a establecerse.

En el piano, la tabla sonora no comienza a oscilar en el instante en que el macillo golpea la cuerda. Necesariamente debería transcurrir cierto tiempo antes de que la cuerda transfiera a la tabla sonora la energía que le permita oscilar regularmente.

Existe entonces un lapso de tiempo, que recibe el nombre de ataque, durante el cual las oscilaciones regulares terminan por establecerse.

El sonido emitido por un instrumento durante el ataque también incluye los ruidos anexos: en el piano, el ruido generado por el mecanismo que impulsa el macillo, en la flauta el ruido causado por el flujo del aire, etc.

Volviendo a la figura, la etapa intermedia comprende el período en que el sonido suena establemente, es el período de sonido sostenido. Esto no significa que durante esa etapa su intensidad no pueda variar - en un violín el músico podría acelerar el arco y de esa manera incrementar la sonoridad del instrumento.

El decaimiento del sonido indica cómo se desvanece cuando se apaga su fuente primaria - cuando el flautista deja de soplar, el pianista suelta la tecla, el guitarrista apaga la cuerda con la yema de su dedo, etc.

El ataque, el período de sonido sostenido y el decaimiento son características fundamentales que influyen en la percepción del timbre de un sonido. Si con un sintetizador de sonidos se desea emular el sonido de algún instrumento musical es indispensable, no sólo que se reproduzca la intensidad de los distintos armónicos, sino también la evolución temporal de su intensidad.

Aquí se puede ver la forma de onda de la trompeta (nota LA₄) y de otra flauta (nota DO₄):

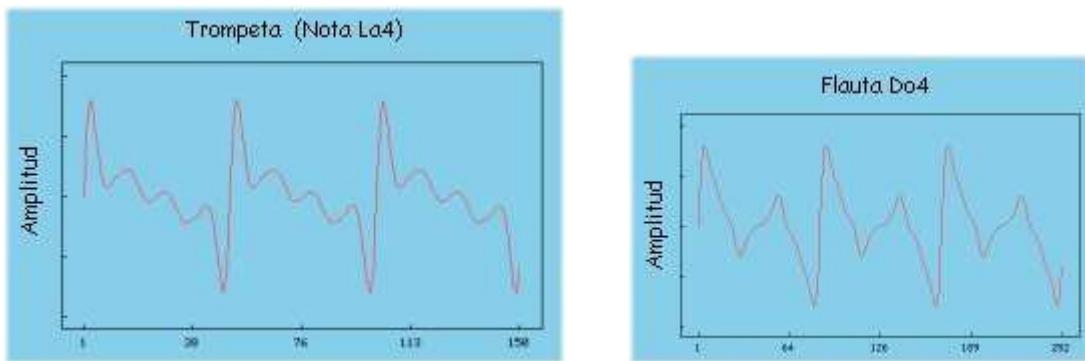


Figura 6: evolución temporal del sonido

Evolución temporal del contenido armónico

En el estudio de la evolución temporal de un sonido, además de analizar las variaciones de su intensidad, también es importante analizar la variación que sufre el contenido en armónicos o contenido espectral del mismo. Y es más, se puede afirmar que es este el factor objetivo que interviene de forma clave en la conformación del timbre característico de cada instrumento.

2.4 Ondas estacionarias y Resonancia

El siguiente paso para adentrarnos en la física de la música y de los instrumentos musicales es comprender cómo algunos sistemas físicos pueden vibrar a unas frecuencias determinadas correspondientes a las notas de las escalas musicales. Los fenómenos de resonancia y de las ondas estacionarias están presentes en las estructuras de todos los instrumentos musicales.

La interferencia de ondas produce efectos curiosos e interesantes, entre ellos la formación de ondas estacionarias cuando se superponen dos ondas de la misma frecuencia y amplitud viajando en sentido contrario.

Esto trae consecuencias sorprendentes que diferencian sustancialmente el comportamiento cinemático y energético de una onda viajera del de una onda estacionaria. Por ejemplo en las ondas estacionarias hay elementos del medio donde sus centros de masa no se mueven en ningún instante y están ubicados en las posiciones denominadas nodos, y elementos del medio donde sus centros de masa están ubicados en las posiciones llamadas vientres, donde en todo instante la pendiente es nula.

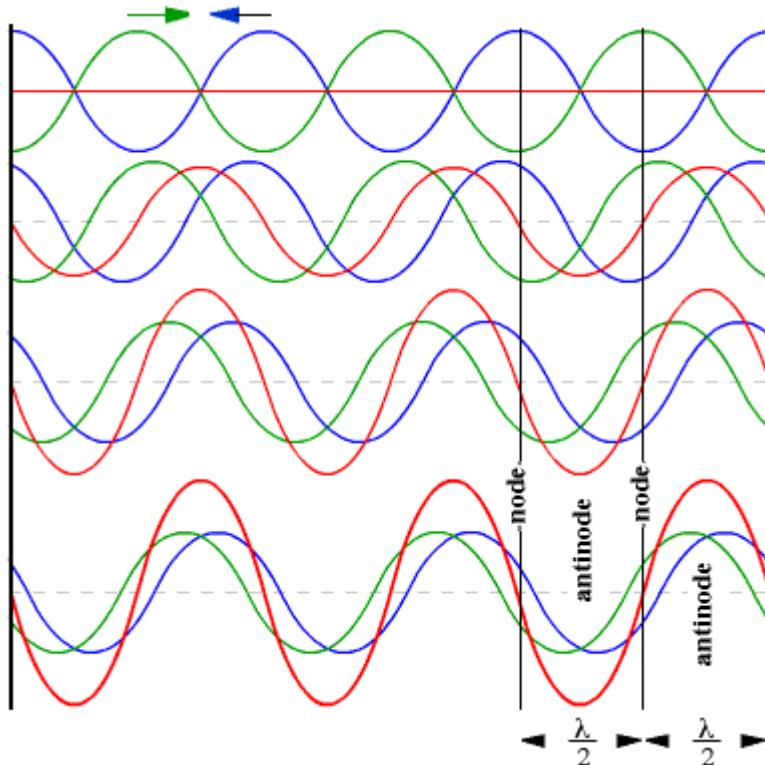


Figura 7: ejemplo de ondas estacionarias

En la práctica como los medios son limitados (poseen fronteras), se va a presentar muy a menudo la superposición de estas dos ondas viajeras (incidente y reflejada) dando lugar a las ondas estacionarias.

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico de dicho cuerpo. En estas circunstancias el cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza.

Una forma de poner de manifiesto este fenómeno consiste en tomar dos diapasones capaces de emitir un sonido de la misma frecuencia y colocados próximos el uno del otro, cuando hacemos vibrar uno, el otro emite, de manera espontánea, el mismo sonido, debido a que las ondas sonoras generadas por el primero presionan a través del aire al segundo.

Precisamente a esta propiedad se recurría antes de que se conocieran los actuales métodos de análisis de sonidos (osciloscopios, etc.). El resonador Helmholtz es una cavidad metálica esférica, provista de dos aberturas de distinto diámetro, donde la grande capta el sonido a analizar y la pequeña se introduce en el oído. Cuando la frecuencia propia de la cavidad coincide con alguno de los armónicos del sonido, se produce resonancia y esa frecuencia se oye con más intensidad. Disponiendo de una serie de resonadores capaces de vibrar para distintas frecuencias, es fácil ir detectando qué armónicos componen ese sonido.



Figura 8: Resonador de Helmholtz

Este efecto puede ser destructivo en algunos materiales rígidos como el vaso que se rompe cuando un tenor canta. Por la misma razón, no se permite el paso por puentes de tropas marcando el paso, ya que pueden entrar en resonancia y derrumbarse.

Así, el 7 de Noviembre de 1940, una suave brisa hizo entrar en resonancia al puente colgante de Tacoma Narrows (Estados Unidos). La frecuencia del viento era similar a la frecuencia natural del puente, con lo cual la energía transferida al sistema era la máxima, es decir, el puente entró en resonancia y aparecieron ondas estacionarias a lo largo de su estructura que acabaron por derrumbarlo.

En este punto es oportuno resaltar el comportamiento de las cajas de resonancia, que como veremos más adelante, tienen especial importancia en los instrumentos de cuerda. En realidad, son cavidades cuya misión es reforzar los sonidos producidos por otra parte del instrumento. El conjunto de frecuencias reforzadas preferentemente por una caja de resonancia constituye lo que se denomina, su "formante".

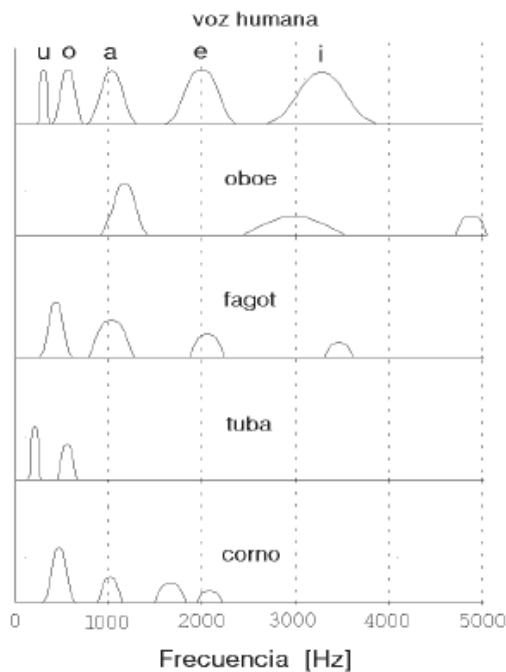


Figura 9: Se muestra esquemáticamente la posición de los formantes de varios instrumentos musicales y también el formante principal asociado a las vocales del idioma español

3. Desarrollo y justificación del proyecto

El siguiente proyecto explica la forma en que el ingeniero podrá entender y acercarse de un modo más práctico al lenguaje musical, sin dejar de tener la fundamentación física de los términos usados en el lenguaje musical, y ayudando en una manera práctica, a crear un vínculo más estrecho entre el ingeniero y el músico para generar una visión armónica entre la parte técnica y la parte artística.

Dentro de este proyecto se explicará también y se dará un panorama general a los instrumentos comúnmente usados en el ámbito musical, sobre todo en el ámbito de orquestas, para que también el ingeniero tenga la visión y el conocimiento de cómo responden estos instrumentos y pueda hacer una correcta colocación y microfonía de los instrumentos, ya sean de viento, de cuerdas, percusiones, etc.

Como cualquier estudio, se debe partir de los conocimientos básicos del sonido, y sobre todo realizar un análisis en resonancia y ondas estacionarias, que constituyen básicamente el estudio de cualquier instrumento musical.

Uno de los puntos donde se requiere mayor cuidado y estudio por parte del ingeniero, es en la construcción de escalas musicales y la composición de melodías. Por ejemplo el conocimiento de las diferentes escalas musicales.

La justificación de este proyecto será el diccionario músico-ingeniero que se anexa al final de esta tesina, como una guía práctica, para el fácil entendimiento del lenguaje musical.

4. Las Escalas Musicales

4.1 Introducción

Como ya se ha comentado antes, todos los sonidos generados por la naturaleza, inclusive los generados por la vibración de cualquier elemento como puede ser una cuerda de una guitarra, o el aire que pasa dentro de los tubos de un instrumento de viento, además de la frecuencia principal que generan, producen armónicos, generalmente con volumen mas bajo, y guardan una relación matemática con el sonido principal, esta relación es el doble de la frecuencia del sonido principal, el triple, cuatro veces la frecuencia del sonido principal, etc..

Es esta la razón por la cual el oído humano, junto con el cerebro, han evolucionado de forma tal, que al escuchar los sonidos cuyas frecuencias están en la proporción simple (2/1, 3/2, 4/3, etc.), los reconoce como un sonido agradable.

La variedad de tonos que nuestro oído es capaz de percibir es muy elevada, estando acotada tan sólo por los límites de sensibilidad de nuestro sistema auditivo, normalmente desde los 20 Hz hasta los 20.000 Hz. Teniendo en cuenta que el oído humano puede diferenciar sonidos con 1 Hz de diferencia, bien podríamos tener una cantidad ingente de notas en nuestra escala musical. Ahora bien, de este espectro sonoro es preciso elegir ciertas frecuencias o tonos con las que podamos disponer de un conjunto de sonidos que permitan la construcción de las melodías. Del mismo modo que un pintor requiere unos determinados colores en su paleta para hacer sus cuadros, el músico necesita una escala musical concreta con la que componer y ejecutar su música.

La gama usual de frecuencias de los sonidos musicales, es considerablemente más pequeña que la gama audible, siendo el tono más alto de un piano el de frecuencia 13.186 KHz., este valor podemos considerarlo como el límite superior de los tonos fundamentales.

En esta sección únicamente se pretenden plasmar los conceptos musicales básicos que posibiliten la futura comprensión de los términos empleados en el estudio de los instrumentos musicales.

4.2 El origen de la escala musical

En música, al emitirse dos o más sonidos simultáneos, se dice que se produce un "acorde", que puede ser consonante o disonante, según si la sensación experimentada sea agradable o desagradable, cuando la sensación agradable es producida por una sucesión de sonidos, entonces se tiene una "melodía". La experiencia enseña que la sensación producida no depende de los valores absolutos de las frecuencias de los sonidos, sino de la relación entre ellas, es decir, del intervalo (cociente de las frecuencias, tomando siempre como numerador la mayor frecuencia), siendo esta sensación tanto más agradable, cuanto más sencillo sea el intervalo entre los dos sonidos.

Como vemos, la melodía consiste en la elección y número de notas que componen un período musical, por ejemplo en las obras de tipo orquestal, la melodía es interpretada por el solista, siendo acompañado por el resto de la orquesta que proporciona la armonía.

El lenguaje empleado en música contiene una serie de expresiones cuyo significado físico interesa conocer, como por ejemplo:

- a) tesitura (tono de un sonido);
- b) color (características propias del timbre);
- c) crescendo y descrescendo (intensidad de un sonido que aumenta o disminuye);
- d) forte, piano, pianísimo (máxima intensidad que puede producirse, sonido suave y muy suave);
- e) trémolo (producir una nota de frecuencia fundamental inferior a los 16 Hz, aunque rica en armónicos);
- f) vibrato (variaciones rápidas y pequeñas en el tono de una nota).



Figura 10: La figura representa a Pitágoras estudiando las relaciones entre la tensión de las cuerdas y el sonido para una longitud igual de las mismas. Se trata de un grabado del libro "Theorica Musicae", de Franchino Gaffurio (Biblioteca Trivulziana-Milán).

En la música es muy importante la relación que existe entre la frecuencia de los distintos sonidos, a esta relación se le llama intervalo. Los intervalos musicales pueden medirse en términos de la relación de frecuencias de los sonidos, aunque en música reciben nombres propios cuya correspondencia física depende del tipo de escala utilizada.

Los más importantes, por su simplicidad y su importancia a la hora de construir la escala musical, son:

- La octava. Cuando la cuerda media un medio del total, el sonido se repetía, pero más agudo. La octava es lo que correspondería a un salto de ocho teclas blancas del piano; o mejor dicho, una octava es la repetición de un sonido con una cuerda con la mitad de longitud, por tanto, otra nota armoniosa. Su frecuencia es doble.
- La quinta es otro intervalo entre notas que se obtiene con una cuerda de largura dos tercios de la inicial. Su frecuencia es de tres medios del sonido inicial. Corresponde a un salto de cinco teclas blancas en un piano.
- La cuarta es, como las anteriores, otro intervalo entre notas que se obtiene con una cuerda de largura tres cuartos de la inicial. Su frecuencia es cuatro tercios de la nota inicial.

Así a partir de un sonido original obtenemos diferentes notas armoniosas. Haciendo un pequeño esquema nos aclararemos mejor:

Nota	Frecuencia	Long. cuerda
Original	F	L
Octava justa	2f	1/2L
Quinta mayor	3/2f	2/3L
Cuarta justa	4/3f	3/4L
Tercera mayor	5/4f	4/5L
Tercera menor	6/5f	5/6L

Si suponemos que la nota inicial es el do, entonces, la octava, quinta y cuarta son las notas:

Nota base	Cuarta	Quinta	Octava
Do	Fa	Sol	Do (1 octava más alta)

Que corresponden a la cuarta, quinta y octava notas respectivamente de la escala diatónica (las teclas blancas del piano).

Se puede definir un etalón, como una nota estándar de la cual podemos derivar todas las otras notas. Para entender como es la relación entre las notas musicales y como se definieron estas a través de los años, vamos a establecer una primera nota fundamental o estándar que será la nota de La central que tiene una frecuencia de 440 Hz. Aquí podemos un dibujo con fragmento de las teclas del piano con el nombre que reproduce su nota musical, además se encuentra la frecuencia que produce esa nota musical.

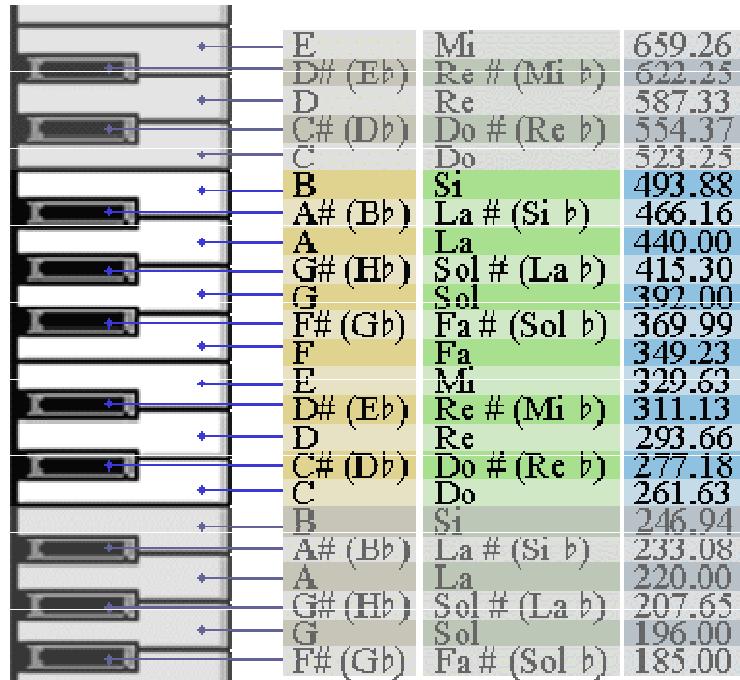


Figura 11: Grupo de teclas por octavas y distancia entre frecuencias

En este esquema se puede ver que las teclas forman grupos de 12 (7 blancas y 5 negras), y estos grupos se repiten de izquierda a derecha. Cada ocho teclas blancas se cierra un grupo y se abre otro, y la distancia musical entre esas teclas se llama octava, y su escala es igual a 2:1 - esto es, la frecuencia de la misma nota de siguiente octava es el doble, y la de octava anterior es la mitad. La distancia de dos octavas le corresponde a la relación de frecuencias de 4:1, tres octavas - 8:1 etc, para sumar distancias tenemos que multiplicar las relaciones de frecuencias. La nota "La" (o "A") es la nota de etalón - su frecuencia es 440 Hz.

Esta ordenación de los sonidos musicales ha sido fruto de un largo proceso. Desde la elección de un sonido base, a partir del cual construir el resto, a la determinación del intervalo que hay entre una nota y la siguiente.

Así, una escala es una serie de notas ordenadas de forma ascendente o descendente, donde a la primera de las notas se la llama tónica.

4.3 El nombre de las notas musicales

El italiano Guido de Arezzo, (995-1050), en el año 1026, introdujo el pentagrama e inventó la escritura de las notas, (do, re, mi, fa, sol, la). Arezzo, para crear su escala musical, utilizó la primera sílaba de cada verso de un himno dedicado a San Juan, que se atribuye a Paulo Diácono y que decía:



Ut queant laxis	Para que puedan
Resonare fibras	Con toda su voz
Mira gestorum	Cantar tus maravillosas
Famuli tuorum	Hazañas estos tus siervos,
Solve polluti	Deshaz el reato de
Labii reatum	Nuestros manchados labios,
Sancte Ioanes	¡Oh, bendito San Juan!

Más tarde, por las dificultades para cantar, la ut se cambió por do. Pero debieron transcurrir cinco siglos, hasta el XVI, para que se completara la escala musical, tal como hoy la conocemos. Se recurrió al mismo himno que Arezzo había utilizado en el siglo XI, y con las iniciales de San Juan que, por entonces, se escribía Sante Ioanes, y se formó la séptima nota - SI - y la octava fue la repetición del Do.

Actualmente también se utilizan las letras A, B, C, D, E, F, G para designar las notas musicales.

Las denominaciones más comunes de los sonidos son

Inglés:	C D E F G A B
Alemán:	C D E F G A H
Español, italiano y francés:	Do Re Mi Fa Sol La Si

Estas son las 7 notas de la escala diatónica. De cualquier forma, en una octava se utilizan 12 notas (las de la escala cromática). Las 5 notas restantes se simbolizan añadiendo a la derecha el carácter # (sostenido) o b (bemol).

En música la representación gráfica de los sonidos se hace por medio de unos símbolos (las notas), que se escriben sobre una pauta llamada pentagrama. El pentagrama es una manera de realizar una notación musical de tal modo que la misma sea fácilmente transmisible a otras personas.



Figura 12: Un típico pentagrama en clave de Sol

Básicamente los pentagramas están formados por un conjunto de cinco líneas dispuestas de forma paralela. A la izquierda del conjunto de líneas aparece un símbolo distintivo llamado "clave". Esta clave es la que determinará a qué nota musical corresponde cada uno de los símbolos musicales que aparecen en el pentagrama. En el gráfico anterior encontramos un símbolo que identifica a la "clave de Sol".

Existe una variedad considerable de claves en otras notas como Do y Fa, por ejemplo. Como vemos a continuación, el símbolo de la clave de Fa es:



Figura 13: Un pentagrama en clave de Fa

Las notas musicales que aparecen dentro del pentagrama pueden colocarse justo encima de alguna de las líneas o en los espacios entre las mismas. Según la clave que corresponda (Sol, Do, Fa, etc.) y la ubicación específica entre las líneas, cada símbolo musical nos brindará información sobre una única nota. La duración en el tiempo de la misma vendrá dada por las características del símbolo musical utilizado.

La nota, gracias a su aspecto y su posición, permite definir simultáneamente tres parámetros:

- La posición vertical de la nota define su altura (aguda o grave). Cuanto más arriba se sitúe la nota sobre las líneas o los espacios del pentagrama, más aguda será.
- La posición horizontal de la nota define cuando es emitida. Así, el eje horizontal del pentagrama define una escala de tiempo creciente desde la izquierda hacia la derecha. Si existiesen dos notas en la misma columna, estarían emitidas simultáneamente.
- La forma de la nota define su duración. Duraciones estándar de notas están definidas en solfeo; cada una es dos veces más corta que la siguiente. Así, se tiene:

La redonda , blanca , negra , corchea , semicorchea , fusa , etc.

Así, una blanca es dos veces más corta que una redonda, una negra dos veces más corta que una blanca...

4.4 La Escala Natural

Tomando como base la frecuencia 55Hz (que en la escala musical es el LA más grave del piano) y a esta frecuencia la multiplicamos por 2, luego por 3 y así sucesivamente, obtendremos distintas frecuencias, que además constituyen distintas notas musicales. A estas frecuencias las colocaremos en una tabla y asignaremos su equivalente nota musical.

1a Octava	55							
2a Octava	110			165				
3a Octava	220	275		330	385			
4a Octava	440	495	550	605	660	715	770	825
5a Octava	880							
	La	Si	Do	Re	Mi	Fa	Sol	
	A	B	C	D	E	F	G	H

Observamos que la primera octava tiene sólo una nota que tiene la frecuencia 55hz, la segunda octava tiene dos notas con las frecuencias 110hz y 165hz, la tercera octava cuatro notas con las frecuencias 220hz, 275hz, 330hz y 385hz, y la cuarta octava tiene ocho frecuencias, o sea, ocho notas. Estamos frente a una octava completa natural. Ahora vamos a calcular las distancias entre las notas:

440	8:9	495	9:10	550	10:11	605	11:12	660	12:13	715	13:14	770	14:15	825	15:16	880
A4		B4		C5		D5		E5		F5		G5		H5		A5
1:1		9:8		5:4		11:8		3:2		13:8		7:4		15:8		2:1

En las celdas superiores intermedias se indica la distancia entre las frecuencias vecinas, y en las celdas inferiores, la distancia con respecto a la frecuencia principal, que en nuestro ejemplo es 440 Hz. La numeración de octavas (4a o 5a) corresponde al estándar contemporáneo.

El producto de todas las relaciones intermedias es igual a 2, esto es, a una octava. La escala que acabamos de construir se conoce como escala natural.

La distancia musical entre la nota principal (La 55 Hz) y la segunda armónica (La 110 Hz) es 2/1(octava).

La distancia musical entre la segunda armónica (La 110 Hz) y la tercera armónica (Mi 165 Hz) es 3/2 (quinta), como entre las notas A4 y E5

La distancia entre la tercera armónica (Mi 165 Hz) y la cuarta armónica (La 220 Hz) es de 4/3 (cuarta), como entre las notas E5 y A5.

4.5 La Escala Pentatónica

Los músicos antiguos, que no tenían el concepto de escala natural, intuitivamente ajustaban (afinaban) las cuerdas (o en el caso de instrumentos de viento, adecuaban su longitud y grosor, distancia entre agujeros, etc.) de manera que produjeran un sonido lo más agradable posible para el oído humano.

Dentro de una octava, la combinación de sonidos más pura es la quinta, es decir, el intervalo musical entre dos notas cuyas frecuencias se relacionan como 3:2. (En nuestro ejemplo, estas notas son A y E) Al escoger como la base la nota A4, iremos dos quintas arriba y abajo, tenemos la siguiente serie de 5 sonidos: 195.5556, 293.3333, 440, 660, 990

Estas frecuencias están más cerca de las notas: G3, D4, A4, E5 y B5. Vamos a transportarlas a la misma octava (multiplicando o dividiendo por 2 cuando sea necesario) y calcular las distancias entre las notas:

293.33	8:9	330.00	27:32	391.11	8:9	440.00	8:9	495.00	27:32	586.67
D4		E4		G4		A4		B4		D5

La distancia de 9/8 se llama tono (T). La distancia de 32/27 es igual a 1.5 tonos (TS). Esta serie de cinco intervalos musicales, T-TS-T-T-TS se llama escala pentatónica, y el sistema musical en que se usa esta escala, se llama pentafonía.

Cabe mencionar que se puede escoger como base cualquiera de las 12 notas del piano y construir una escala pentatónica. Por ejemplo, las cinco teclas negras forman precisamente una pentafonía. El famoso mural en el palacio de Assurbanipal's representa la orquesta de la corte Elamita. En este mural se puede observar que están tocando una armonía simple basada en las quintas (Curt Sachs, *The Rise of Music in the Ancient World: East and West*, first edition).



PLATE 3: Members of the court orchestra of Elam, playing harps, double oboes, and a drum. Relief in the British Museum, c. 650 BCE. After Sachs.

Figura 14:Mural del palacio de Assurbanipals'

4.6 La Escala Diatónica

Ya sabemos que dos notas de una quinta producen juntas un sonido agradable. Dentro de la quinta, se encuentra un sonido más formando un triplete en que las frecuencias se relacionan como 4:5:6. Este triplete se llama armonía. La escala natural tiene una sola combinación armónica, las notas A-C-E. Al descubrir la armonía, los músicos antiguos empezaron a afinar sus instrumentos de manera que toda la escala musical fue compuesta de armonías continuas, como esta:

352	4:5	440	5:6	528	4:5	660	5:6	792	4:5	990	5:6	1188
F4		A4		C5		E5		G5		B5		D6

Vamos a construir una octava y calcular la distancia entre las notas vecinas:

264	8:9	297	9:10	330	15:16	352	8:9	396	9:10	440	8:9	495	15:16	528
C4		D4		E4		F4		G4		A4		B4		C5
do		re		mi		fa		sol		la		si		do

Esta serie de notas o distancias entre ellas se llama escala diatónica. La distancia de 9/8 es un tono, la distancia de 10/9 está muy cerca y se llama tono menor, y la distancia de 16/15 es aproximadamente igual a una mitad del tono, y se llama semitono. La serie de tonos (T) y semitonos (S): T-T-S-T-T-T-S, donde el semitono es el tercer intervalo, se llama tonalidad mayor. Para construir una tonalidad menor tenemos que iniciar esta secuencia desde la nota A: T-S-T-T-S-T-T. Aquí el semitono es el segundo. La diferencia entre estas tonalidades ya había sido descubierta por los músicos antiguos: la misma melodía tocada en tonalidades diferentes (mayor o menor), tiene un carácter diferente, lo que permite expresar sentimientos mediante la variación de la tonalidad de la música. Las canciones que usan una tonalidad mayor son alegres y vivaces, mientras que las que usan una tonalidad menor son tristes y melancólicas.

Otra vez, podemos escoger como base para construir una tonalidad, cualquiera de las 12 notas, 24 diferentes en total. Estas tonalidades llevan el nombre de la nota principal y la palabra "mayor" o "menor", por ejemplo, «Do mayor» o C, «La menor» o Am, etc.

A continuación indicamos las distancias de las notas en una tonalidad mayor respecto a la nota principal y sus nombres:

264	297	330	352	396	440	495	528
C4	D4	E4	F4	G4	A4	B4	C5
1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2
primera	segunda	tercera	cuarta	quinta	sexta	séptima	octava

4.7 La Escala Cromática o Temperada

Al descubrir las tonalidades, los músicos antiguos quisieron tener la posibilidad de pasar libremente entre ellas. Evidentemente, para hacerlo, se necesitan construir escalas mayores y menores comenzando con cada una de las siete notas que tenemos. Los resultados de esos cálculos están presentados en la siguiente tabla:

A		275.00	293.33		330.00		366.67		412.50	440.00		495.00
Am	264.00		297.00		330.00	352.00		396.00		440.00		495.00
B		278.44		309.38	330.00		371.25		412.50		464.06	495.00
Bm		278.44	297.00		334.13		371.25	396.00		445.50		495.00
C	264.00		297.00		330.00	352.00		396.00		440.00		495.00
Cm	264.00		297.00	316.80		356.40		396.00	422.40		475.20	
D		278.44	297.00		334.13		371.25	396.00		445.50		495.00
Dm	267.30		297.00		334.13	356.40		400.95		445.50	475.20	
E		275.00		309.38	330.00		371.25		412.50	440.00		495.00
Em	264.00		297.00		330.00		371.25	396.00		445.50		495.00
F	264.00		293.33		330.00	352.00		396.00		440.00	469.33	
Fm	264.00	281.60		316.80		352.00		396.00	422.40		475.20	
G	264.00		297.00		330.00		371.25	396.00		445.50		495.00
Gm	267.30		297.00	316.80		356.40		396.00		445.50	475.20	
C		D		E	F		G		A		B	

Esta tabla tiene 25 sonidos diferentes (18 nuevos). Y esto no es todo, porque cada uno de esos nuevos sonidos puede engendrar su propia escala, tanto mayor como menor - ¡la octava al final va a tener cerca de 100 notas! Sería sumamente difícil tocar un instrumento de tantas teclas. Los griegos antiguos hicieron un compromiso: introducir notas "extra" sólo donde el intervalo entre las notas vecinas sea un tono entero (C-D, D-E, F-G, G-A, A-B), de manera que la distancia mínima dentro de una octava sea igual a un semitono. Como resultado de esto, las notas adicionales obtenidas ocupan las posiciones donde se encuentran las teclas negras del piano.

Pitágoras propuso derivar todas las 12 notas de puras quintas (de la misma manera que nosotros lo hicimos para construir una escala pentatónica). Vamos a empezar otra vez con la nota A4 que tiene la frecuencia de 440Hz, pasar quinta a quinta 6 veces arriba, sucesivamente multiplicando la frecuencia por 3/2, y 6 quintas abajo, dividiendo por 3/2:

38.63	57.94	86.91	130.37	195.56	293.33	440.00	660.00	990.00	1485.00	2227.50	3341.25	5011.88
D#1	A#1	F2	C3	G3	D4	A4	E5	B5	F#6	C#7	G#7	D#8

La primera y la última nota de esa escala es la misma nota D#, aunque de diferentes octavas, la D#8 está a siete octavas arriba del #. Aquí surge un problema: en esta escala no es posible pasar directamente de D#1 a D#8 octava a octava (multiplicando por 2 la frecuencia). Las 7 octavas no son iguales a las 12 quintas. Esta discrepancia (que es igual a $(3/2)^{12} \cdot 2^7 = 1.013643$ aproximadamente, o sea, 0.2346 de semitono) lleva el nombre de coma pitagoreana. Si queremos preservar pura la quinta, tenemos que cambiar la octava, que es una distancia aún más fundamental en la música.

La última reforma musical fue inspirada por un organista alemán, Andreas Werckmeister, a fines del siglo XVII. El propuso hacer todos los semitonos iguales. El problema planteado así tiene una única solución: la distancia musical entre cada una de las notas vecinas debe ser igual a la raíz doceava de 2, o sea, $2^{1/12}$. Este sistema por lo general se denomina sintonización bien temperada o temperamento igual. La escala de 12 semitonos iguales se llama escala cromática. Cada semitono a su vez se divide en 100 partes iguales que se llaman centavos de semitono. El temperamento asimismo altera la quinta, que llega a ser un poco más corta, y modifica también las demás distancias naturales, quedando pura únicamente la octava. Las ventajas obtenidas son evidentes: ahora se puede pasar libremente entre tonalidades, y de esta manera, se logró eliminar la coma pitagoreana.

Finalmente vamos a comparar la escala natural, la escala pitagoreana y la escala cromática:

Natural		275.00		302.50	330.00	357.50		385.00	412.50	440.00		495.00
Pitagoreana	260.74	278.44	293.33	309.03	330.00	347.65	371.25	391.11	417.66	440.00	463.54	495.00
Cromática	261.63	277.18	293.66	311.13	329.63	349.23	369.99	392.00	415.30	440.00	466.16	493.88
	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B

Para calcular la frecuencia de cada nota en la escala cromática, dada su escala (a cuantas teclas está de la nota de etalón La), se usa la siguiente fórmula: $F_i = 440 \cdot 2^{i/12}$

Aquí i es la escala o la distancia de la nota de etalón. Si es negativa, la tecla está a la izquierda.

Ejemplo: la frecuencia de la nota Do (que está 9 teclas a la izquierda) es: $440 \cdot 2^{-9/12} = 261.63$

A continuación se muestra una figura con el rango de frecuencias de las voces humanas y algunos instrumentos musicales, tomando como referencia la escala de un piano con sus correspondientes frecuencias (se indica con una flecha el Do central).

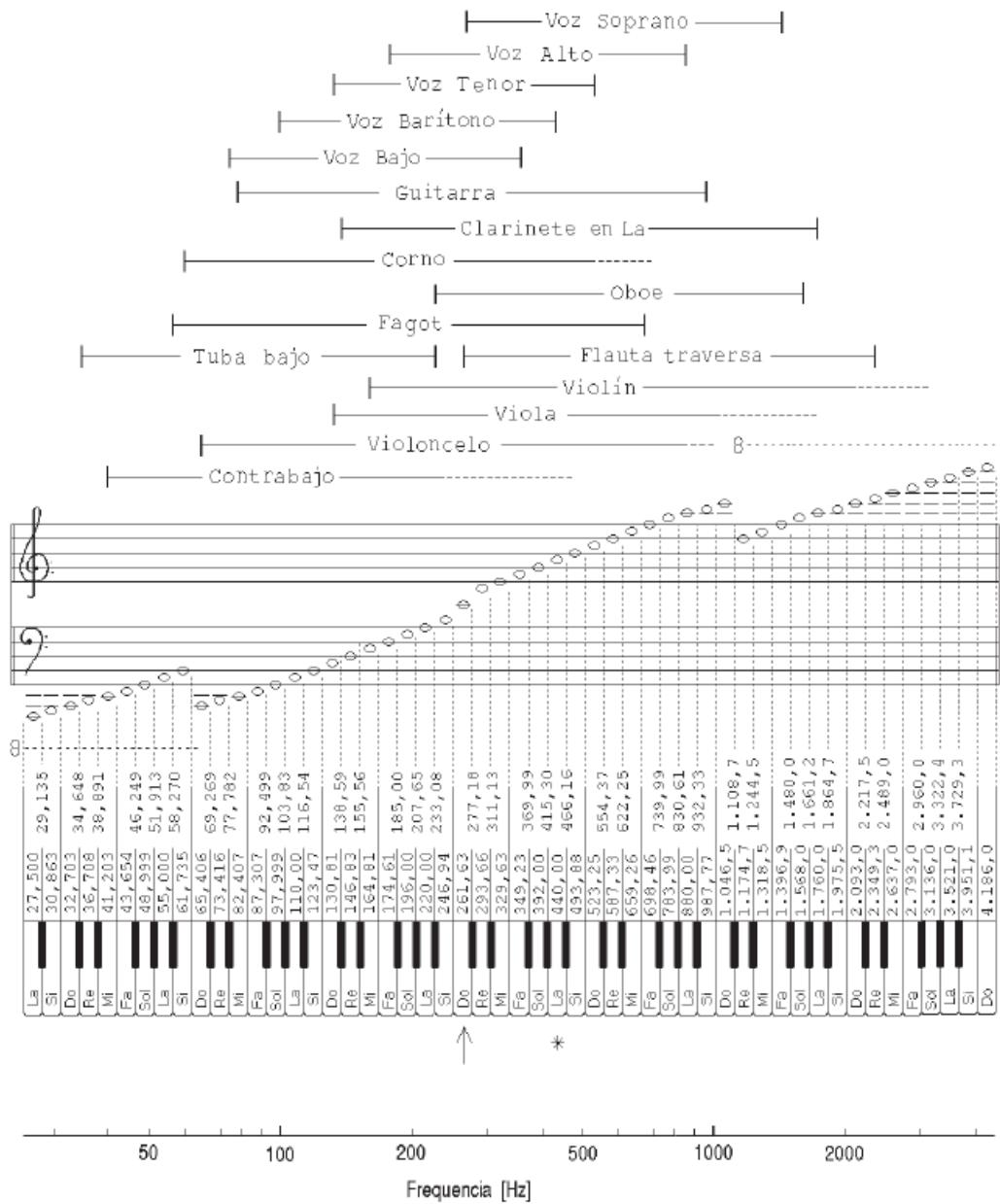


Figura 15: rango de frecuencias de diferentes instrumentos con referencia de un piano.

5. Los Instrumentos Musicales

5.1 Origen de los Instrumentos Musicales

La historia conocida de la música y de los instrumentos musicales tiene miles de años. Aunque las primeras expresiones musicales están veladas por la bruma de la prehistoria, existen silbatos de hueso, flautas de caña o palillos de tambor hallados en cuevas y tumbas que atestiguan el poder del sonido para evocar estados de ánimo y reflejan las huellas del hombre en ritos misteriosos. La Música nace de la necesidad de protegerse de ciertos fenómenos naturales, de alejar los espíritus malignos, de atraer la ayuda de los dioses, de honrarlos y festejar sus fiestas y celebrar el cambio de las estaciones. En la antigüedad la música sólo se destinaba a los actos religiosos hasta que los griegos la introdujeron en la celebración de sus juegos deportivos.

Se acepta que el chino Ling-la, por el año 3.000 a.C., fabricó la primera flauta de bambú; por aquél entonces, la música china se creaba, únicamente, a base de 5 notas (escala pentatónica).

También existen evidencias de que los egipcios empleaban arpas y flautas. Además, hacia el año 2.000, agregaron los instrumentos de percusión en sus orquestas. Ya en el año 1.500 a.C., los hititas, introdujeron la lira, la guitarra, la trompeta y los tamboriles para ejecutar sus danzas religiosas. La música en Babilonia tenía escalas de 5 y 7 notas. Por el año 800 a.C., en caracteres cuneiformes, se hizo la primera grabación musical: el himno sumerio. Por esa época, los rapsodas recorrían caminos y ciudades para cantar sus narraciones, acompañándose de liras, instrumentos provistos de 7 cuerdas.

En el 600 a.C., se produce un hecho importante: aparece el vina hindú, instrumento que consistía en dos calabazas huecas unidas por cuerdas que se pulsaban con una delgada caña de bambú. El vina está considerado como el origen del que arranca toda la familia de los instrumentos de cuerda.

Además, se tiene la certeza de que una primera forma de oboe se utilizó en Roma el año 50 d.C., en la misma ciudad, por el año 350, se fundó la primera Scuola Cantorum.

Siguiendo con los instrumentos, en el año 1050, el arpa llegó Europa y en el 1200 se introdujo el címbalo, como instrumento musical.

En el continente europeo, en el último cuarto del primer siglo, el órgano de viento reemplazó al órgano de agua.

Siguiendo los rastros de los adelantos musicales, hay constancia de que por el año 850, se hicieron los primeros intentos para crear música polifónica.

5.2 Introducción a los Instrumentos Musicales

Si la música es el arte de organizar el sonido con el fin de expresar algo, podemos afirmar que un instrumento musical es cualquier objeto que sea utilizado por el ser humano para producir sonidos en el marco de una creación musical. Es decir, potencialmente cualquier objeto podría ser un instrumento musical.

Si bien por definición, cualquier objeto es potencialmente un instrumento musical, vamos a centrarnos en el estudio de ciertos principios de funcionamiento acústico en los que se basa un conjunto importante de los instrumentos musicales más usados dentro de nuestra cultura.

Los instrumentos musicales están compuestos, al menos, por un oscilador. Muchos instrumentos musicales disponen también de un resonador. En este caso, puede ser interesante estudiar la forma en que están acoplados oscilador y resonador. Finalmente es importante identificar la fuerza que excita el oscilador y, particularmente, la forma en que se lo excita.

Por ejemplo, en un instrumento de cuerdas, la cuerda es el oscilador, la caja de resonancia es el resonador, mientras que la forma en que se aplica la fuerza depende del instrumento: el dedo en la guitarra, un martillo en el piano, un arco en el violín, el viento en el caso del arpa eólica, etc.

Si lo importante de un instrumento musical es que puede producir un sonido, entonces el estudio desde el punto de vista acústico de un instrumento musical debe centrarse en la forma en que se produce dicho sonido. Y más ampliamente en la influencia (incidencia) de cada una de las componentes del sistema (oscilador, eventual resonador y forma de excitación) sobre los parámetros del sonido, estos son: frecuencia fundamental (en general nos interesaría saber cuál es la serie de armónicos que se producen y a partir de qué parámetros se genera cada una de las frecuencias que la componen), intensidad, duración, timbre (forma de onda).

6. Clasificación de los Instrumentos Musicales

Al estudiar los instrumentos musicales, es frecuente encontrarse con la clásica división de los instrumentos en tres familias: viento, cuerda y percusión. Este sistema, aunque muy aceptado, es poco preciso, y así, por ejemplo se incluyen en percusión tanto los instrumentos propiamente percutidos como cualquier otro que simplemente no sea de cuerda ni de viento.

Clasificación Clásica o Tradicional

- Viento: Los instrumentos de viento generan un sonido cuando se hace vibrar una columna de aire dentro de ellos. La frecuencia de la onda generada está relacionada con la longitud de la columna de aire y la forma del instrumento, mientras que la calidad del tono del sonido generado se ve afectada por la construcción del instrumento y el método de producción del tono.
- Cuerda: Los instrumentos de cuerda generan un sonido cuando la cuerda es pulsada. La frecuencia de la onda generada (y por ello la nota producida) depende generalmente de la longitud de la porción que vibra de la cuerda, la tensión de cada cuerda y el punto en el cual la cuerda es tocada; la calidad del tono varía en función de cómo ha sido construida la cavidad de resonancia.
- Percusión: Los instrumentos de percusión crean sonido con o sin afinación, cuando son golpeados, agitados o frotados. La forma y el material de la parte del instrumento que es golpeada y la forma de la cavidad de resonancia, si la hay, determinan el sonido del instrumento.

Obviamente, esta clasificación tiene bastantes defectos, y si bien es cierto que podría ser adecuada para una primera introducción al estudio de los instrumentos musicales, no sería apropiada para la realización de un estudio más profundo.

Brevemente, cabe señalar que los defectos de dicha clasificación radican en que está orientada a los instrumentos de la orquesta sinfónica, y, además, clasifica los instrumentos de manera bastante ilógica: atendiendo al cuerpo sonoro en el caso de las cuerdas, a la fuerza activante en los vientos y a la acción que produce el sonido en el caso de la percusión. Esta variedad de principios ordenadores conlleva desorganización y confusión y, además, excluye muchos instrumentos primitivos y los instrumentos eléctricos. Y estos problemas, como es de esperar, no solo aparecen al clasificar los instrumentos formales, sino también al aplicarla a los informales.

Algunos musicólogos, para paliar las carencias de las que adolece, añaden a la clasificación tradicional las siguientes categorías.

- Voz: La voz humana es un instrumento en sí mismo. Un cantante genera sonidos cuando el flujo de aire de sus pulmones hace vibrar las cuerdas vocales. La frecuencia es controlada por la tensión de las cuerdas vocales y la calidad del tono por la forma del tracto vocal. La voz permite generar un amplio rango de sonidos.
- Teclados: Los instrumentos de teclado son instrumentos de viento (órgano), cuerda (clavicordio), percusión (piano) o electrónicos (sintetizador) que son tocados utilizando un teclado, de forma que cada tecla genera uno o más sonidos. Muchos instrumentos de teclado tienen otros medios (pedales en el caso del piano, paradas en el caso del órgano) para alterar esos sonidos.
- Electrónicos: Los instrumentos electrónicos generan sonido por medios electrónicos. Generalmente imitan a otros instrumentos en su diseño, especialmente a los instrumentos de teclado.

En 1914, los musicólogos Erich M. Von Hornbostel y Curt Sachs idearon una clasificación mucho más lógica que pretendía englobar a todos los instrumentos existentes. Esta clasificación es mucho más precisa, ya que tiene en cuenta los principios acústicos que hacen sonar a los diferentes instrumentos.

Así, se establecen cinco grandes clases de instrumentos musicales, que a su vez se dividen en grupos y subgrupos:

- Aerófonos: utilizan el aire como fuente de sonido. Se subdividen en aerófonos de columna (constan de un tubo sonoro cuya columna aérea actúa como cuerpo sonoro y determina la frecuencia de los sonidos emitidos más que el dispositivo de excitación) y aerófonos libres (la frecuencia del sonido depende del dispositivo que excita la columna o masa de aire, que actúa sólo como resonador). El aire incluido en una cámara puede ser puesto en movimiento al ser empujado soplando hacia un bisel (flautas), por la vibración de una lengüeta batiente (oboes y clarinetes) o libre (armónicas), o bien de los labios del ejecutante. Algunos instrumentos actúan directamente en el aire circundante (roncadores).



- Cordófonos: el sonido es producido mediante una o varias cuerdas en tensión. Se suelen subdividir en cuatro categorías según el modo de excitación: punteados con los dedos o con ayuda de un plectro (arpas, guitarras, bandurrias, laúdes, vihuelas, salterios, clavecines), frotados con un arco (violines, etc.), o golpeados con macillos (pianos, tímpanos...)



- Idiófonos: están formados por materiales naturalmente sonoros. Se los subdivide según el modo de excitación: percutidos, punteados, sacudidos, frotados, raspados... (campanas tubulares, xilófono...).



Membranófonos: producen sonido mediante una o más membranas tendidas sobre sus correspondientes aberturas (son, básicamente, los tambores, aunque también otros instrumentos, como el mirlitón o el kazoo).



- Electrófonos: el sonido se produce y/o modifica mediante corrientes eléctricas. Se suelen subdividir en instrumentos mecánico-eléctricos (mezclan elementos mecánicos y elementos eléctricos) y radio-eléctricos (totalmente a partir de oscilaciones eléctricas).



A continuación, se muestra una tabla más detallada con dicha clasificación:

Clasificación de los instrumentos por Sachs y Hornbostel			
TIPO	DEFINICIÓN	Forma/Modo de Ejecución	EJEMPLOS
AERÓFONOS	El sonido se produce al vibrar una COLUMNA DE AIRE.	Boquilla o embocadura	Tuba, Trompa, Trompeta, Trombón, Helicón, Bombardino, Corneta, Serpentón, Sousafón
		Bisel	Flauta travesera, piccolo
		Lengüeta simple	Clarinete, Saxofón
		Lengüeta doble	Oboe, Corno inglés, Fagot, Contrafagot, Tenora
		Lengüeta libre	Armónica, acordeón
		Mixta	órgano de Iglesia, gaita gallega
CORDÓFONOS	El sonido se produce al vibrar una CUERDA tensa.	Frotada	Violín, viola, violonchelo, contrabajo, Viola da gamba, viola da braccio
		Pulsada o pellizcada	Guitarra, laúd, bandurria, balalaika, banjo, ukelele, timple, guitarrico, guitarrón, vihuela, Cítara, salterio, arpa, clave
		Percutida con teclado	Piano, clavicordio
IDIÓFONOS	El sonido se produce al vibrar el PROPIO CUERPO del	Entrechoque	Claves, Castañuelas, látigo, platillos, crótalos

MEMBRANÓFONOS	El sonido se produce al vibrar una MEMBRANA.	instrumento.	Golpeados o percutidos	Triángulo, plato, caja china, instrumentos de láminas (xilófono, marimba, glockenspiel (lira o campanas), celesta, metalófono, vibráfono), campanas, cencerros, tamtam, gong, litófonos, agogó, campanillas, glockenspiel de cristal
		Sacudidos	Sistro, sonajero de discos (pandereta de varilla), cabasa, cascabeles, pandereta, maracas, tubos	
		Raspados	Güiro, matracas, raspador de madera	
		Punteados	Caja de música, arpa de boca (guimbarda o birimba)	
		Frotados	Armónica de cristal, Serrucho	
		Soplados	Piano chanteur (varillas con recipientes de vidrio)	
ELECTRÓFONOS	El sonido se produce por medios ELÉCTRICOS.	Percutidos	Timbales, Tambor, pandero, Bombo, caja de redoble, bongós, congás (tumbas o tumbadoras), tomtom	
		Frotados	Tambores de fricción, zambomba	
		Soplados	Mirlitón, silbato, matasuegras, kazoo	
ELECTRÓFONOS	El sonido se produce por medios ELÉCTRICOS.	Instrumentos tradicionales	Piano eléctrico, saxo midi, gaita midi, Guitarra eléctrica, Bajo eléctrico.	
		Nueva construcción	Sintetizador, Ondas Martenot, Theremin	

6.1 Los Instrumentos de Cuerda

6.1.1 Introducción a los Instrumentos de Cuerda

El funcionamiento de los instrumentos de cuerda, también llamados cordófonos, se basa en la vibración de una serie de cuerdas tensadas por sus dos extremos. Todos ellos disponen de una caja de resonancia construida en madera para aumentar su sonoridad. Como ya se ha comentado, hay tres tipos de instrumentos cordófonos en función de la forma de hacer vibrar las cuerdas: en los de cuerda pulsada se utilizan los dedos (guitarra, arpa, laúd, bandurria, mandolina, banjo, timple); si se emplea un arco, se trata de instrumentos de cuerda frotada (violín, viola, violonchelo, contrabajo, ravel); y cuando el sonido se produce mediante el golpeo de unas mazas, hablamos de instrumentos de cuerda percutida (cimbalón).

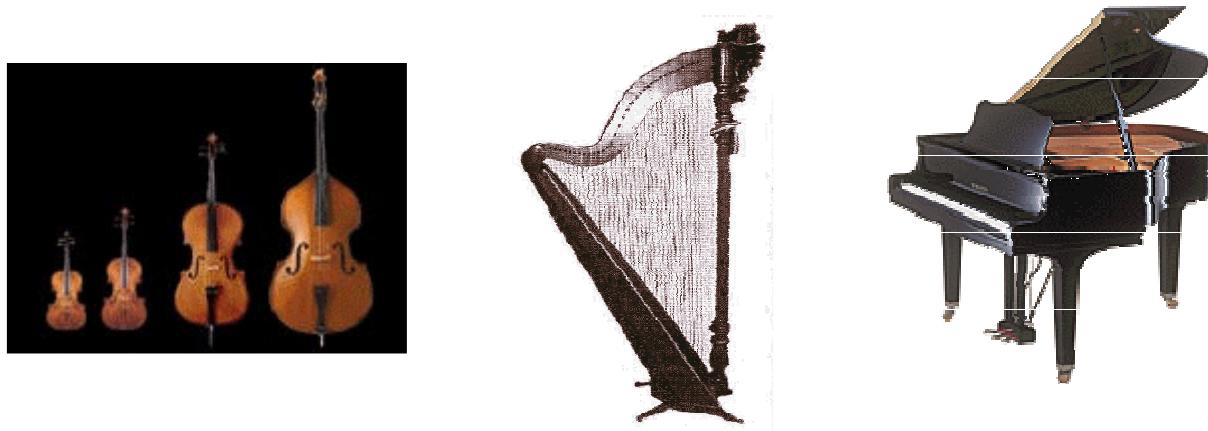


Figura 16: Algunos instrumentos musicales de cuerda.

De los dos tipos principales de vibraciones que se pueden producir, longitudinales y transversales, en las cuerdas sólo interesa el segundo de ellos, ya que es la forma en la que vibran las cuerdas musicales.

Cuanto mayor sea el peso, la longitud y el espesor de una cuerda, y menor sea su tensión, más pequeño será el número de vibraciones por segundo, y por tanto más grave será el sonido que produzcan, ocurriendo lo contrario a la inversa.

Las cuerdas musicales pueden ser de entonación fija y de entonación variable. Al primer grupo pertenecen las cuerdas que sólo producen un sonido, como consecuencia de su longitud constante (piano, clavicordio, clave, arpa, cítara, etc.), mientras que al segundo grupo pertenecen las de la misma cuerda, que pueden producir varios sonidos, ya que el ejecutante mediante movimiento de los dedos, modifica a voluntad la longitud útil de la cuerda (violín, viola, violonchelo, contrabajo, etc.). Tanto en un caso como en otro, la afinación de la cuerda depende de la tensión a la que esté sometida, que se regula mediante la mayor o menor presión de la clavija a la que va sujetada.

Debemos recordar que la forma de la onda correspondiente para cada una de las dos funciones arbitrarias permanece constante a lo largo de la cuerda. Esta conclusión no es completamente cierta en la práctica, ya que hemos hecho unas suposiciones para encontrar la ecuación de ondas que no se cumplen estrictamente en las cuerdas reales, ya que estas tienen espesor y existen fuerzas disipativas, lo que originará que las ondas que se propaguen presenten distorsión. Para cuerdas relativamente flexibles y con pequeño amortiguamiento, como en los instrumentos musicales, la distorsión es pequeña si la amplitud de las perturbaciones es también reducida; pero para amplitudes grandes el cambio de la forma de la onda puede ser pronunciado.

En los instrumentos musicales las cuerdas pueden entrar en vibración principalmente por tres procedimientos, en primer lugar, pulsándolas como en el arpa, guitarra, laúd, etc.; en segundo lugar golpeándolas como en el piano, y en tercer lugar pueden ser friccionadas como en el violín, contrabajo, etc.

Además, estas funciones están limitadas por las condiciones frontera en los extremos de la cuerda. Las cuerdas reales tienen una longitud finita y están fijas de alguna forma en sus extremos. El efecto más importante de este tipo de condición frontera es la necesidad de que el movimiento de la vibración libre de la cuerda sea periódico.

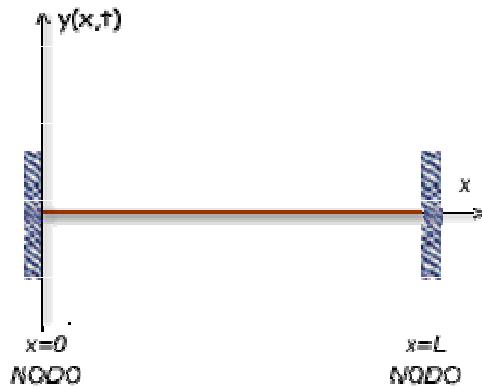
6.1.2 Principios de Funcionamiento de los Instrumentos de Cuerda

Ondas estacionarias en una cuerda con extremos fijos

A continuación se ilustra una cuerda atada en sus extremos (como una cuerda de guitarra). En este caso se dice que las fronteras de la cuerda son dos nodos.

Cuando se perturba la cuerda, por ejemplo en su extremo izquierdo, se genera una onda que se denomina la onda incidente, y_i , la cual al reflejarse en el extremo derecho origina una segunda onda que se denomina reflejada, y_r , que tiene la misma frecuencia y longitud de onda,

$$y_i = A_i \sin(kx - \omega t), \quad y_r = A_r \sin(kx + \omega t + \phi)$$



Por lo tanto, la cuerda oscilará con una superposición de estas dos ondas:

$$y = y_i + y_r = A_i \operatorname{sen}(kx - \omega t) + A_r \operatorname{sen}(kx + \omega t + \varphi)$$

Las condiciones de frontera son:

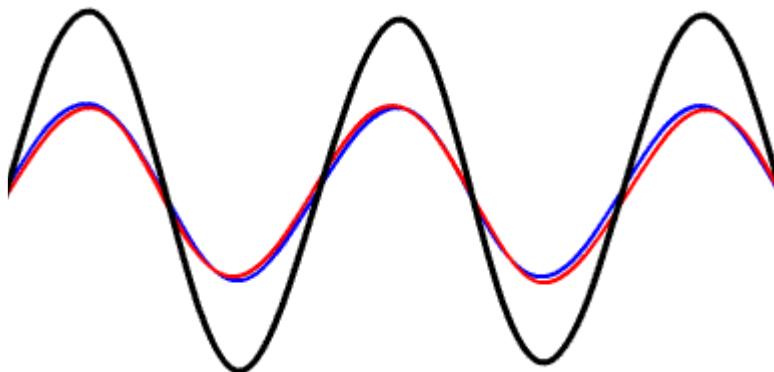
$$y(0,t) = y(L,t) = 0$$

$$(y_i)_{\text{ext}} = -(y_r)_{\text{ext}}$$

Entonces, la cuerda oscila con una superposición de dos ondas viajeras propagándose en sentidos opuestos pero con todos sus parámetros iguales (amplitud, número de onda, longitud de onda, frecuencia, período).

$$y = 2A \operatorname{sen} kx \cos \omega t$$

A continuación se ilustra este hecho, representando en color negro la onda total:



Como ya hemos visto, a este tipo de ondas se les denomina ondas estacionarias.

Nodos y Vientes:

En una onda estacionaria hay elementos del medio cuyos centros de masa se mantienen quietos en todo instante (nodos) y hay elementos del mismo cuyo centro de masa vibra en una posición denominada viente en donde la pendiente es cero en todo instante de tiempo. Entre nodo y nodo o entre viente y viente consecutivos hay una separación de

$$\frac{\lambda}{2}$$

por lo que la separación entre vientes y nodos consecutivos será

$$\frac{\lambda}{4}$$

La cuerda tiene una colección de frecuencias a las cuales podrá vibrar como onda estacionaria. A estas frecuencias se les denomina frecuencias propias o frecuencias naturales

$$f_n$$

A la frecuencia más baja,

$$f_1 = \frac{V}{2L}$$

se le denomina frecuencia del primer armónico o frecuencia fundamental. A la segunda frecuencia

$$f_2 = 2f_1$$

se le denomina frecuencia del segundo armónico, y así sucesivamente.

A cada armónico n (o también llamado onda estacionaria n) de la cuerda con extremos fijos, le corresponde una onda dada por la ecuación:

$$y_n = 2A_n \operatorname{sen} k_n x \cos \omega_n t$$

Y a la expresión

$$\omega_n(x) = 2A_n \operatorname{sen} k_n x$$

se le denomina perfil del armónico. Como

$$y_n = a_n(x) \cos 2\pi f_n t$$

se concluye que cuando la cuerda con extremos fijos vibra como una onda estacionaria (es decir, en un armónico), todas sus elementos (exceptuando los nodos) vibran con movimiento armónico simple pero con una amplitud que dependerá de la posición del elemento sobre la cuerda

$$a_n(x)$$

pero todos tienen igual frecuencia

$$f_n$$

Cada armónico tiene una longitud de onda

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

y una frecuencia

$$f_n$$

diferentes a los demás armónicos. Sin embargo, el producto de estas dos magnitudes debe ser constante para todos los armónicos,

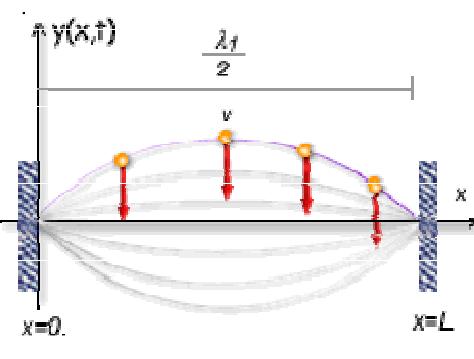
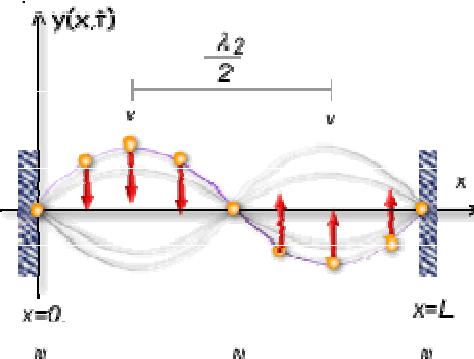
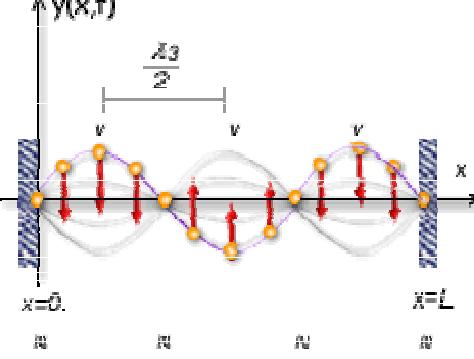
$$\lambda_n f_n = V$$

A continuación se analizarán los primeros armónicos de esta cuerda sujetada por sus extremos.

En la figura, N significa nodo (elementos de la cuerda que no vibran) y V vientre (elementos de la cuerda que vibran con la máxima amplitud $2A_n$).

La relación de la columna 3 se obtiene observando las gráficas de la columna 2. La relación de frecuencia de la columna 4 se puede obtener a partir de la columna 3 sabiendo que

$$\lambda_n f_n = V$$

N ARMÓNICO	PERFIL DEL ARMÓNICO	LONGITUDES DE ONDA CONTENIDAS EN L	FRECUENCIA
1		$L = \frac{\lambda_1}{2}$	$f_1 = \frac{V}{2L}$
2		$L = 2\left(\frac{\lambda_2}{2}\right)$	$f_2 = 2f_1$
3		$L = 3\left(\frac{\lambda_3}{2}\right)$	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
n	⋮	$L = n\left(\frac{\lambda_n}{2}\right)$	$f_n = \frac{nV}{2L}$

Mediante la observación de los perfiles de los armónicos se puede concluir que:

$$f_n = \frac{nV}{2L}$$

donde n son los números naturales, V la velocidad de propagación de las ondas viajeras transversales en la cuerda y L la longitud de la cuerda.

Resumiendo, si partimos de una cuerda tensa y elástica de longitud L sujetada por sus dos extremos (condición necesaria para que entre en vibración) y producimos una perturbación en su centro desplazándola de su posición de equilibrio, ésta tenderá a recuperar la posición de equilibrio mediante oscilaciones que perturbarán el aire generando ondas sonoras. Puesta en movimiento vibratorio una cuerda musical, las vibraciones se propagan a lo largo de la misma reflejándose en sus extremos, formando puntos donde la amplitud de las vibraciones es nula (nodos), mientras que se alcanzan otros puntos donde la amplitud de las vibraciones es máxima (vientres).

Las frecuencias de oscilación de la cuerda, son equivalentes a las frecuencias de las ondas producidas en el aire al perturarse por el movimiento de las cuerdas, produciendo un sonido. El valor de las frecuencias producidas por una cuerda de longitud L, es:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \quad \quad \omega_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \text{ Hz} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

A partir de la ecuación anterior se pueden extraer varias conclusiones: se observa que si se varía la tensión T de la cuerda, manteniendo su longitud y su masa constante, se obtienen sucesivas series de armónicos, de forma análoga se obtienen manteniendo fija su tensión y su masa y variando su longitud. Así mismo, si se aumenta la tensión o se disminuye su longitud, la frecuencia aumenta. De forma análoga, para igualdad de longitud y tensión en la cuerda, las pesadas y gruesas producen sonidos más graves que las ligeras y delgadas.

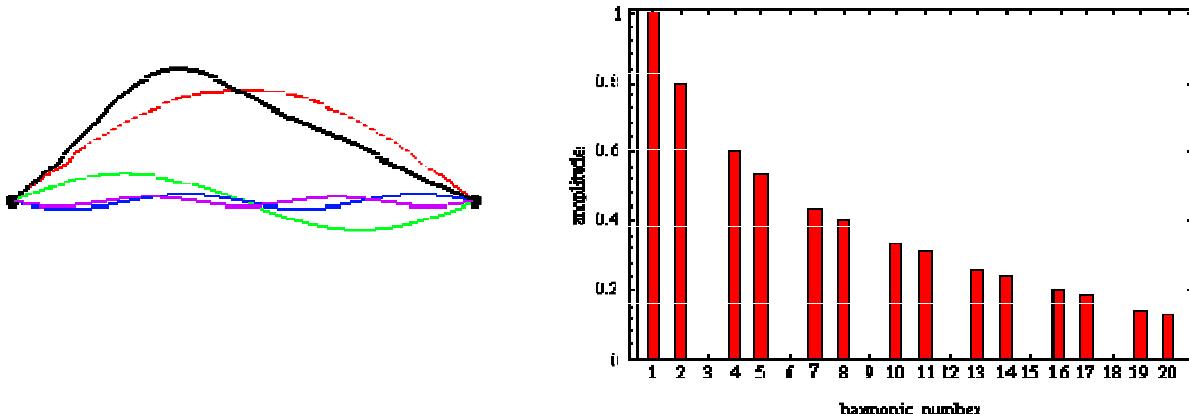
Vibraciones producidas por la pulsación de una cuerda fija

Cuando una cuerda fija por sus dos extremos es puesta en vibración mediante la pulsación de la misma, ésta adquiere lo hace a partir de varios de sus modos de resonancia naturales al mismo tiempo.

Las frecuencias de resonancia con las que vibrará dependerán del desplazamiento inicial provocado por la pulsación.

Por el Teorema de Fourier, podemos descomponer la vibración de la cuerda en sus diferentes armónicos.

El dibujo de abajo muestra la descomposición en los 6 primeros armónicos de la posición inicial de la cuerda al ser pulsada a 1/3 de su longitud.



Como se puede ver, están presentes los siguientes armónicos:

$n=1, n=2, n=4, n=5$

Los armónicos $n=3$ y $n=6$ no están presentes. Esto es debido a que los patrones de onda estacionaria poseen un nodo en el lugar donde se ha realizado la pulsación. De este modo, todos los modos de vibración múltiplos del tercero poseen un nodo en $L/3$ y no serán excitados.

Se puede construir un "espectro de frecuencias" para la vibración de la cuerda pulsada del ejemplo determinando la amplitud de todos los modos presentes en la vibración.

La figura de la izquierda muestra este espectro para el ejemplo de la cuerda pulsada a $1/3$ de su longitud. Notar que, como se ha explicado, todos los modos múltiplos de 3 no están presentes.

Modos de resonancia de la caja de un violín

El factor determinante a la hora de determinar el timbre de un instrumento de cuerda es, sin duda, el modo de resonar de la caja de resonancia, es decir, el modo en que atenuará o amplificará los armónicos generados por las cuerdas a ser excitadas.

A continuación podemos ver los modos de resonancia de una caja de violín, obtenidos mediante el Método de Chladni.



6.1.3 Clasificación de los Instrumentos de Cuerda

Los instrumentos de cuerda se pueden dividir en tres grupos, de acuerdo con la forma de producir la vibración:

1) Cuerdas frotadas: las cuerdas se ponen en vibración al ser frotadas con un arco, que es una varilla de madera flexible y ligeramente curva, con crines de un extremo a otro cuya tensión puede regularse. Las cuerdas están dispuestas sobre una caja de resonancia provista de orificios.

A continuación se enumeran los instrumentos musicales pertenecientes a este grupo, de acuerdo con el tamaño de la caja, de menor a mayor: violín, viola, contrabajo, violonchelo.



Todos estos instrumentos están dotados de una gran sensibilidad, pudiendo producir los más delicados matices de timbres y volumen.

2) Cuerdas pulsadas, en estas cuerdas, la vibración se obtiene mediante la pulsación de la cuerda.

Se puede citar el arpa, formada por una serie de cuerdas de distinta longitud, tensadas sobre un bastidor de forma triangular, cuyo lado inferior es la caja de resonancia. El clavicémbalo, que es un instrumento de tecla cuyas cuerdas se pulsan por púas mediante un mecanismo que se acciona por un teclado. La cítara y el clavecín, que tienen las cuerdas alojadas en caja de madera, y finalmente la guitarra y el laúd, que tienen las cuerdas tendidas sobre la caja de resonancia. Es decir los instrumentos que forman este segundo grupo son: el arpa, el clavicémbalo, la cítara, el clavecín, la guitarra acústica y el laúd.

3) Cuerdas percutidas, en este grupo se logra la vibración al golpearlas mediante pequeños martillos. Las cuerdas se encuentran encerradas en una caja de madera, que se comporta como una caja resonante.

A este grupo pertenecen el piano y el clavicordio, en los que la percusión se efectúa mediante las teclas, mientras que en el címbalo, perteneciente también a este grupo, la percusión es directa.

Los instrumentos musicales de este grupo son: el címbalo, el clavicordio, el piano de cola y de pared.

Puesto que las cuerdas pueden vibrar simultáneamente, de forma distinta, y según la forma de excitación, con los tres procedimientos de pulsación se obtiene una producción diferente de los armónicos que acompañan al fundamental, por lo que la pulsación influye sensiblemente sobre el timbre.

Otra división se podría realizar atendiendo a que los instrumentos tengan variable o fija la longitud de las cuerdas. El violín, viola, violonchelo, contrabajo, guitarra y laúd, tienen la longitud de las cuerdas variable siendo el ejecutante el que al mover los dedos, sobre las cuerdas, limita a voluntad la longitud de las mismas, obteniendo la nota deseada. El resto de los instrumentos musicales mencionados tienen la longitud fija, por lo que necesitan una cuerda por cada nota que se desea obtener. En todos los instrumentos mencionados anteriormente, se alcanza la tensión deseada, al girar las clavijas lo que se conoce como afinación.

En algunos instrumentos de cuerda, cuya longitud es fija mediante unos pedales se modifican las condiciones de vibración de las cuerdas, por lo que se enriquece el número de sonidos a emitir.

Las cuerdas frotadas

Se encuentran en este grupo el violín, viola, violonchelo, contrabajo y sus predecesores. Entre estos tenemos el rebad, rabel, quintón y otros muchos. Se necesitaron siglos para que el desarrollo de los instrumentos de cuerdas frotadas culminara en la obra de arte lograda por Stradivarius. Los siglos anteriores a dicho logro, fueron de experimentación, desarrollo y evolución. Una de las formas más primitivas de estos instrumentos es, sin duda, el rebad que en un principio se tocaba pinzando sus cuerdas y posteriormente con el arco. Este instrumento se toca en Irán desde hace unos veinticinco siglos. Otro instrumento de cuerda muy antiguo es el ravanastrón, de algunas partes de la India y Ceilán.

El violín alcanzó la forma en la que se le conoce en la actualidad, durante los siglos XVII y XVIII, no sufriendo ningún cambio importante posteriormente. En la figura siguiente se muestra una vista interior y exterior de un violín. El sonido se produce generalmente al frotar la cuerda con el arco, al mismo tiempo que con los dedos de la mano izquierda, se presiona a la cuerda, haciendo traste en el diapasón. Esta presión es función del coeficiente de frotamiento y de la velocidad relativa. Cuando el violinista mueve su mano izquierda, a lo largo del diapasón, acorta o alarga el segmento que vibra de la cuerda.

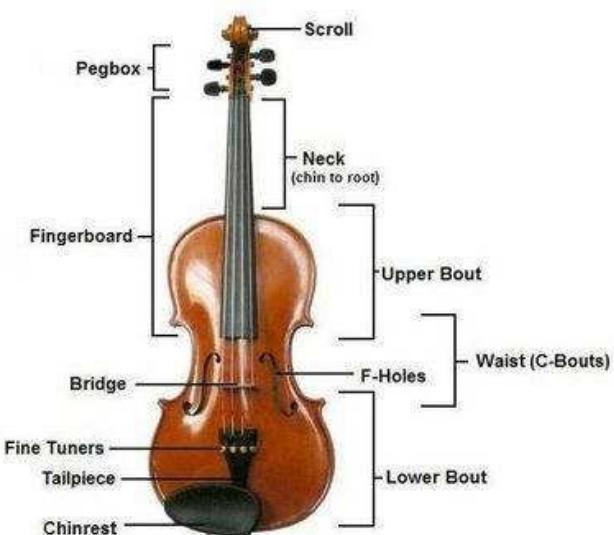


Figura 18: Secciones de un violín.

El arco de los instrumentos de cuerda, consta de tres elementos, la parte de madera flexible, una tira de cerdas que frota las cuerdas y un sencillo mecanismo que estira las cerdas y regula la tensión de la parte de madera. Esta parte puede ser muy flexible o demasiado rígida.

El arco ha tenido una historia y desarrollo muy interesantes. Durante siglos, su parte de madera, formaba una concavidad con las cuerdas, de forma parecida a la de los arqueros. Esta forma del arco posee la ventaja de la posibilidad de tocar sobre tres o cuatro cuerdas simultáneamente, mediante una mayor presión del mismo. Pero tiene, asimismo sus inconvenientes. Era mucho más difícil realizar lo que se conoce como "spiccato" y "staccato" que son distintas formas de emplear el arco, en las que el mismo no permanece sobre la cuerda, sino que salta sobre ella, produciendo así una serie de sonidos entrecortados y picados. Poco a poco,

los violinistas idearon un arco, en el que su parte de madera o vara es algo convexa con las cerdas, en vez de cóncava como en un principio.

Todos los arcos aun siendo distintos tienen algunas cosas en común. El arco se puede dividir en tres partes: la parte superior formada por la punta del arco, capaz de producir sonidos y frases delicadas; su parte media, que produce aquellas formas expresivas obtenidas al saltar el arco sobre la cuerda; y la parte inferior del mismo, que da el sonido fuerte y brillante. Cuando la frotación del arco es rápida y de igual velocidad, presionando ligeramente el sonido es suave, aterciopelado y aflautado, cuando es lento, uniforme, intenso y de mayor presión es pleno, rico y brillante.

El violín es un instrumento ágil, con un sonido brillante y timbrado, conviene tratarle acústicamente con cierta reverberación. Su característica direccional es función de la frecuencia, radiando a altas frecuencias la máxima energía en la dirección transversal al traste, mientras que a bajas frecuencias tiene una característica más o menos direccional. La caja del violín tiene los extremos aplastados, terminando perpendicularmente al mango, y sus orificios simétricos tienen forma de f.

La viola en comparación con el violín, es algo mayor de tamaño produciendo un sonido dulce, suave y algo opaco, necesita un tratamiento acústico con paneles de refuerzo. En la viola la caja de resonancia es de forma más alargada que la del violín terminando en ángulo agudo sobre el mango, con orificios en forma de C. Los entrantes laterales son más acusados en el violín que en la viola, que tiene el dorso plano y es algo mayor que aquel. El puente queda entre los orificios.

Las diferencias físicas entre la viola y el violín, originan entre los dos instrumentos unos sonidos distintos con clara superioridad del violín, aunque sólo tiene cuatro cuerdas y la viola seis. Su característica de radiación es parecida a la del violín, mientras que su rango dinámico y direccional tiene unos valores parecidos a los del violín.

El violonchelo tiene un registro más grave que el violín con sus cuatro cuerdas afinadas, una octava más grave que la viola, produce un sonido lleno y bello, con un timbre cálido y aterciopelado.

El violín y la viola se colocan sobre el brazo izquierdo del ejecutante, mientras que el violonchelo por su gran tamaño, se apoya en el suelo sobre una pica de metal, siendo sujetado por el violonchelista entre sus rodillas, ya que toca sentado. Este instrumento necesita cierta reverberación y paneles de refuerzo como tratamiento acústico.



El contrabajo es el instrumento de este grupo que tiene la tesitura más grave y de mayor dimensión, diferenciándose de los demás en que su afinación es en cuartas en vez de en quintas. Produce un sonido lleno y muy grave, necesitando un tratamiento acústico que proporcione una notable reverberación.

El sonido real de cada nota es una octava más grave, tiene un timbre seco y brusco, siendo un instrumento de poca agilidad, ejecutando los acordes con cierta dificultad, no es un instrumento solista, aunque tiene una gran importancia en la música orquestal, proporcionando un sólido apoyo en los bajos.

Las cuerdas pulsadas

En este grupo se encuentran el arpa cromática y la de pedales, clavicémbalo, la guitarra, mandolina, clavecín, ukelele de Hawái, kin y pi-pa de China, koto de Japón, sarod y vina de la India, laúd, tiorba, espineta, lira, balalaika y cítara.

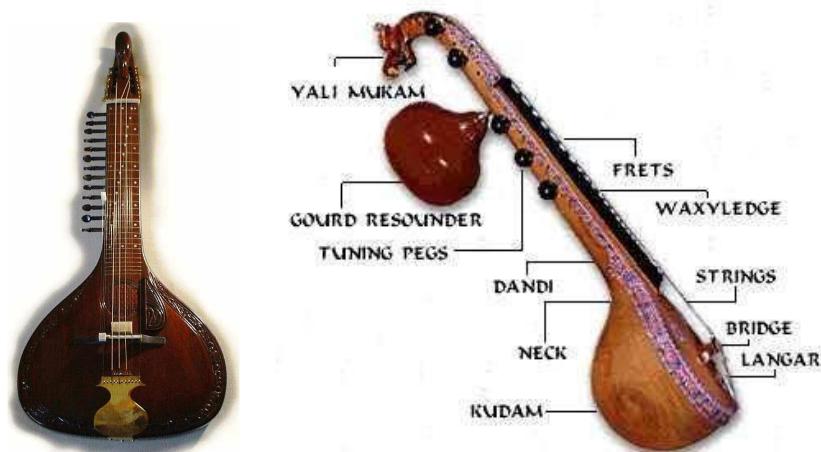
El clavicémbalo o clave, es un instrumento de teclado, en el que las cuerdas se pulsan por púas, mediante un mecanismo accionado por un teclado. En el clavicémbalo, cada tecla va conectada a una pequeña pieza de madera, denominada martinete, en la que se fija la púa. Cuando se pulsa la tecla, la púa pulsa la cuerda que le corresponde. Su sonoridad es seca, si se la compara con la del piano.



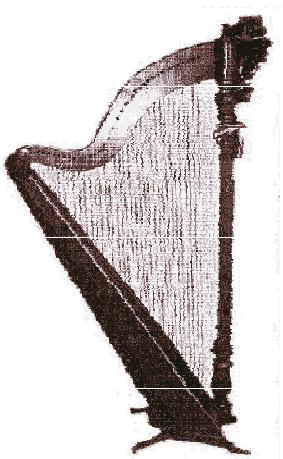
El laúd y la tiorba fueron en cierto modo precursores de la guitarra actual, que ha alcanzado su máximo desarrollo en España. El grado de amplificación de su sonoridad, se puede controlar de tal manera, que cuando se origina el sonido golpeando la cuerda, suena muy suave. Mientras vibra, por tal medio puede aumentarse su sonoridad y mientras dura y se sostiene tal amplificación, la mano del instrumentista puede deslizarse sobre la cuerda a otros sonidos y lograr así ondulaciones melódicas. Su máxima radiación energética se realiza en la dirección transversal al puente de la caja y el hueco.



La vina india está generalmente hecha de dos grandes calabazas, que actúan como cajas de resonancia. Sobre estas calabazas existe un tablero plano para el empleo de los dedos que antiguamente estaba hecho de bambú y sobre el cual se hallan colocadas sus siete cuerdas. Algunos de estos instrumentos poseen siete cuerdas más pequeñas en su parte inferior, que vibran por simpatía con las siete mayores. Otros tienen una calabaza en lugar de dos.



El arpa es uno de los instrumentos musicales más antiguos formado por una serie de cuerdas de diferente longitud y tensadas sobre un bastidor, representando cada cuerda una determinada nota. En el arpa, las cuerdas se ponen en vibración al pulsarse con los dedos de las dos manos.



El arpa de pedales posee una cualidad técnica altamente definitoria, el glissando, que produce un sonido sonoro, imposible para cualquier otro instrumento. Las arpas cromáticas, que se usan muy poco, no tienen pedales, mientras que las clásicas tienen siete. Cada pedal acciona sobre una nota en todas las octavas del instrumento. La cuerda, sin la acción del pedal, da la nota bemolizada (un semitono más baja que el sonido natural); con el simple golpe de pedal, la nota pasa a natural y con el doble, a sostenido (un semitono más alta que el sonido natural).

Las cuerdas percutidas o golpeadas

En este grupo se encuentran el piano, clavicordio y cimbalón.

El clavicordio fue un precursor del piano, en el que las cuerdas son golpeadas por debajo, mediante una laminilla metálica, permanece en contacto con la cuerda. Esto permite que al ejecutante le sea posible hacer vibrar la nota después de haber golpeado la cuerda y, mediante una mayor presión, elevar ligeramente la afinación de cualquiera de las notas, para darle así, una mayor intensidad y relieve.



El cimbalón, es probablemente un instrumento de origen oriental. Sus formas primitivas, denominadas "santir" son conocidas en Irán, Arabia y en el Caúcaso. El sistema cromático moderno se emplea en nuestros días por los gitanos de Hungría. Se toca este instrumento golpeando la cuerda con dos mazas. Son posibles en el mismo, diversas variaciones en su timbre, así como un amplio rango dinámico.



El piano es un instrumento de tecla cuyas cuerdas son golpeadas por pequeños martillos forrados de fieltro. En el piano se golpea la cuerda de forma instantánea, por lo que la vibración es libre y la nota emitida se ve enriquecida con los armónicos de la vibración amortiguada producida. La gran ventaja que tiene el piano frente al clavicémbalo es que tiene la posibilidad de aumentar o disminuir la intensidad sonora, mediante una mayor o menor presión sobre las teclas. Esto permite conseguir una gran matización dinámica. Como vemos la intensidad y la velocidad con que el martillo golpea la cuerda dependen del intérprete, por lo que el número de sonidos a obtener aumenta.



Piano de Pared



Piano de Cola

La velocidad de la percusión determina el timbre, ya que caracteriza la rapidez de desaparición, y por consiguiente, la generación de armónicos. Existen dos tipos de pianos, los de cola y los de pared, diferenciados por su caja armónica en la que se fijan las cuerdas, a lo largo estas, unos listones oblongos denominados "apagadores" son controlados por los pedales. Los apagadores son unas pequeñas piezas de madera forradas, de fieltro, que en el momento en que se deja de presionar una tecla, paran inmediatamente la vibración de la cuerda correspondiente.

6.2 Los Instrumentos de Viento

6.2.1 Introducción a los Instrumentos de Viento

Este tipo de instrumentos consta de uno o varios tubos sonoros, los cuales contienen una columna gaseosa capaz de producir el sonido al ser convenientemente excitada. Las vibraciones del gas contenido en un tubo sonoro son longitudinales, y de igual manera que en las vibraciones transversales de las cuerdas, se siguen formando ondas estacionarias con zonas de vibración nula (nodos) y zonas de vibración máxima (vientres).



Figura 19: De izquierda a derecha tenemos: fagot, clarinete, saxofón alto, corno inglés, oboe y flauta.

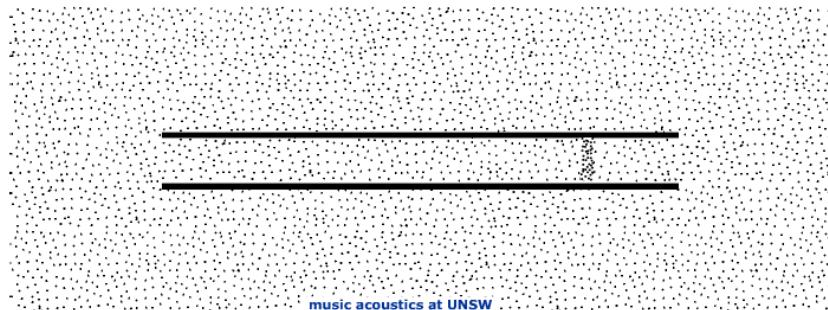
Como podremos comprobar a lo largo de este estudio, la teoría de los tubos abiertos explicará la forma de vibrar del aire en la flauta, la de los cerrados servirá para el clarinete y los tubos de forma cónica servirán de base para el estudio del oboe y el fagot.

La nota más baja de estos instrumentos se consigue tapando todos sus agujeros, de manera que la columna de aire de su interior posea longitud máxima. La columna es acortada levantando los agujeros de manera sucesiva comenzando por el extremo abierto.

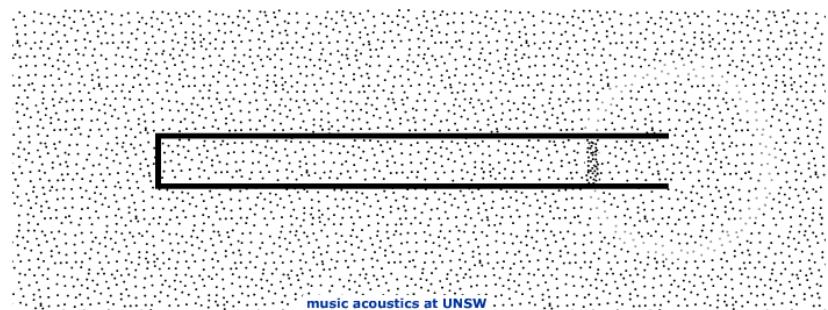
6.2.2 Principios de Funcionamiento de los Instrumentos de Viento

La Acústica musical clasifica en dos grupos a este tipo de instrumentos de tubos sonoros.

Tubos Abiertos: Son aquellos que disponen de dos o más orificios.



Tubos Cerrados: Son aquellos que disponen de un solo orificio.



La generalidad de instrumentos de viento convencionales están formados por tubos abiertos, quedando los cerrados para casos muy concretos como son ciertos tubos de órgano, el Clarinete, la Flauta de Pan y algún otro.

La excitación de la columna gaseosa en estos instrumentos se hace por medio de una embocadura, cuya misión es comunicar el movimiento vibratorio a la referida columna. La abertura donde se encuentra la embocadura no puede ser un nodo, pero tampoco debe ser necesariamente un vientre, pudiendo estar el punto de excitación en un lugar intermedio. De la misma forma no es necesario que las aberturas del tubo coincidan con los extremos. Las aberturas situadas a lo largo del tubo tienen por objeto el dividir la columna gaseosa en segmentos, produciendo cada una de ellas una frecuencia propia.

En los extremos abiertos la reflexión que se produce está en función de la anchura del tubo y de la abertura, comparada con la longitud de onda que se propaga por el tubo. En el caso de los instrumentos musicales el tubo es demasiado estrecho y no se puede disipar toda la energía en el extremo abierto, por lo que se produce el fenómeno de la reflexión. La reflexión hace que se produzca un vientre en dicho extremo abierto. Dicho de otra manera: "En todo extremo abierto de un tubo

sonoro se produce un vientre". Esto último junto con el fenómeno de la difracción tiene una gran importancia para comprender como se generan los armónicos.

Tubos Abiertos

Debido al fenómeno de la reflexión se produce una onda estacionaria en el interior del tubo. Esta onda estacionaria proporciona dos Vientres en los extremos, con lo cual el sonido fundamental se produce cuando en el centro se forme un nodo.

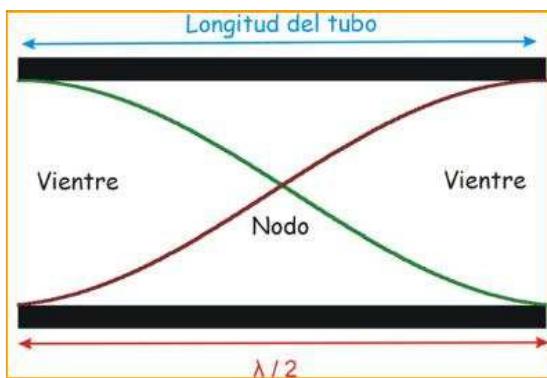


Figura 20: Tubo Abierto produciendo su sonido fundamental

λ es la longitud de la onda, es decir el espacio que recorre la onda en un ciclo. Como tanto la onda de salida (verde) como la onda reflejada (rojo) solo realizan medio ciclo dentro del tubo, tenemos que la Longitud del Tubo es la mitad de la Longitud de Onda ($\lambda/2$).

La frecuencia del sonido fundamental, dependerá de la velocidad de propagación del medio "c" (aire = 330 m/s) y de la Longitud de Onda (λ).

En el caso del aire, en un segundo una onda recorrerá 330 metros, y tenemos una onda de λ metros, si dividimos $330 / \lambda$ obtendremos el número de ciclos que se sucederán en un segundo, o sea, la Frecuencia (Hz).

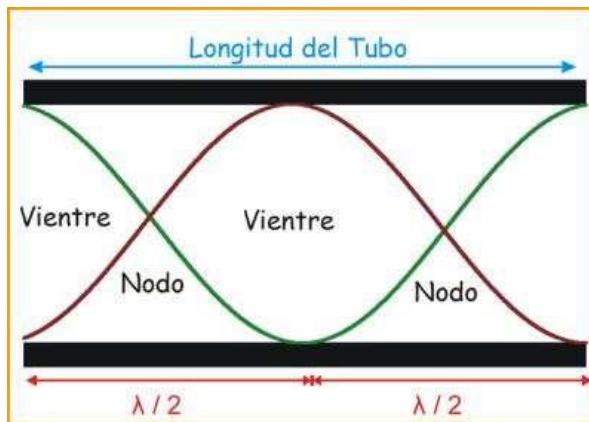
Así tenemos que:

$$f_1 = \frac{C}{\lambda}$$

y sabiendo que $L = \lambda/2$, y despejando obtenemos que la frecuencia fundamental del tubo es:

$$f_1 = \frac{C}{2L}$$

El segundo armónico tiene lugar cuando en el interior del tubo se producen dos nodos.



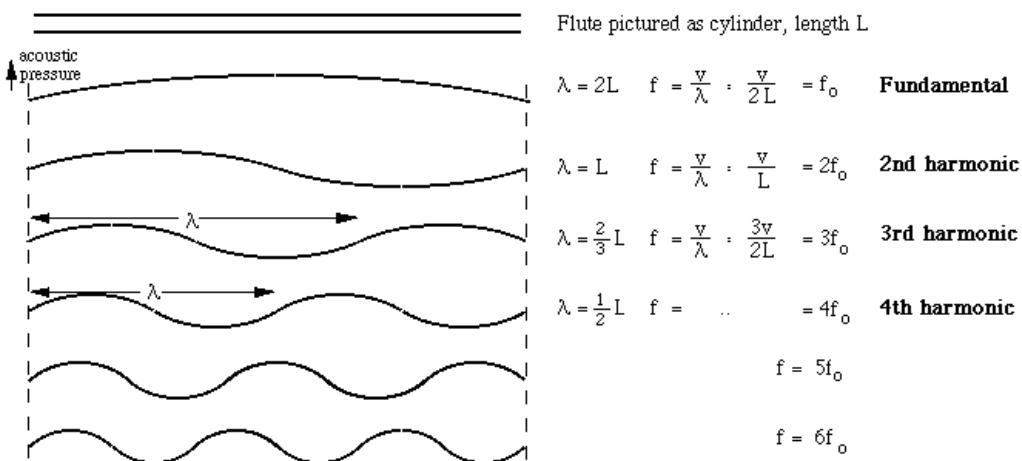
Tubo Abierto produciendo su segundo armónico

Entre cada dos vientos consecutivos habrá $\lambda/2$ luego $L = \lambda/2$ y la frecuencia del segundo armónico, f_2 , será:

$$f_2 = \frac{C}{2L/2} = \frac{2c}{2L}$$

Pero como $c/2L$ es igual a f_1 se puede escribir $f_2 = 2 f_1$

De todo esto podemos deducir que la frecuencia del armónico de grado n , f_n , será $f_n = n f_1$



Por lo tanto en un tubo abierto de longitud L , se pueden producir teóricamente, un sonido fundamental $f_1 = c/2L$ y todos los armónicos de dicho sonido fundamental de frecuencias $2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots, nf_1$.

Tubos Cerrados

En los Tubos Cerrados se produce un nodo en el extremo cerrado y un vientre en el extremo abierto. El sonido fundamental tiene lugar con un solo nodo y un solo vientre; el nodo para completar la onda estacionaria se forma fuera del tubo.

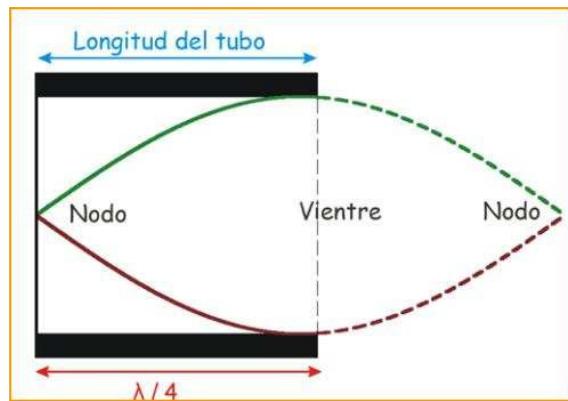


Figura 21: Tubo Cerrado produciendo su sonido fundamental

Si como hemos dicho hasta ahora en el extremo cerrado se produce un nodo, y en todo extremo abierto se produce un vientre, en el tubo solo se formará una cuarta parte del ciclo de la onda, o lo que es lo mismo, $\lambda/4$, para una longitud de tubo L : $\lambda/4 = L$, de donde $\lambda = 4L$.

Y siendo c la velocidad de propagación de la onda, la frecuencia del sonido producido será:

$$f_1 = \frac{c}{4L}$$

El segundo armónico tiene lugar con la producción de dos nodos y de dos vientos.

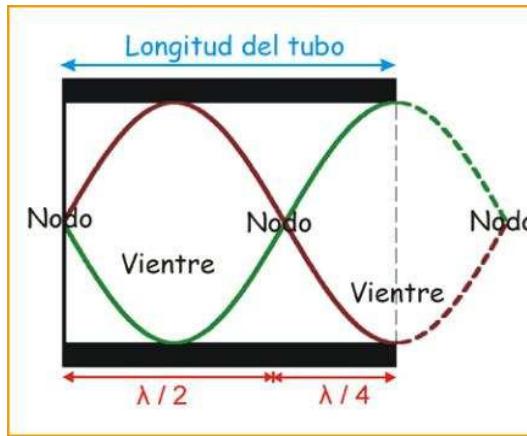


Figura 22: Tubo cerrado produciendo su segundo armónico

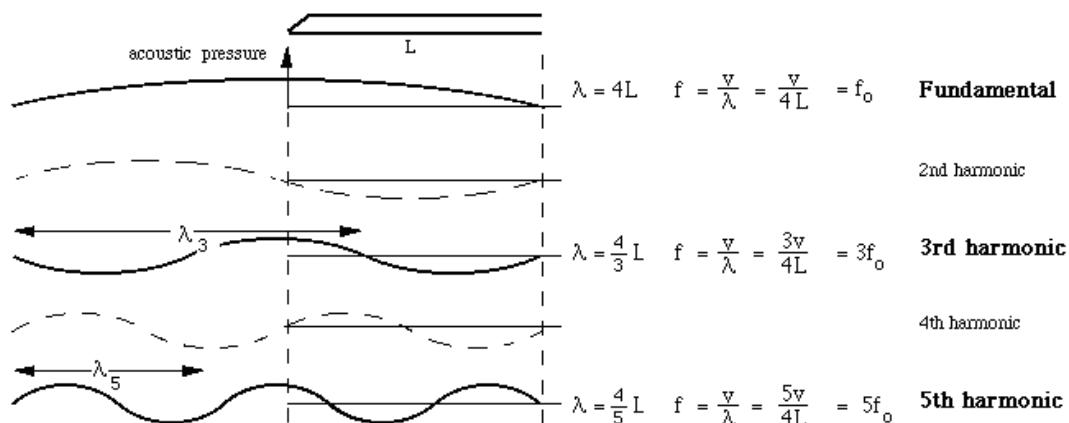
Si tenemos $\lambda/2 + \lambda/4 = L$, la longitud será $L = 3\lambda/4$ y podemos deducir la longitud de onda del segundo armónico: $\lambda = 4L/3$

La frecuencia del segundo armónico del tubo será:

$$f_2 = \frac{C}{\lambda} = \frac{c}{4L/3} = \frac{3c}{4L}$$

Que poniéndola en función del f_1 queda: $f_2 = 3f_1$

Generalizando tenemos que: $f_n = (2n-1) f_1$



Por tanto, en los tubos cerrados no se tienen los armónicos pares.

Las Leyes de Bernouilli

Johann Bernoulli, fue un matemático, médico y filólogo suizo, que vivió entre los siglos XVII y XVIII. Este señor enunció una serie de leyes aplicables tanto a los tubos abiertos como a los tubos cerrados, partiendo de las expresiones anteriormente calculadas:

Tubos Abiertos:

$$f_n = \frac{nc}{2L}$$

Tubos Cerrados:

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4L}$$

Y las leyes son las siguientes:

I. La frecuencia del sonido producido por un tubo, tanto abierto como cerrado, es directamente proporcional a la velocidad de propagación.

Un ejemplo claro de esto se da cuando, una persona inspira Helio en lugar de aire, entonces su voz se vuelve muy aguda mientras le dure el Helio que ha almacenado en sus pulmones. La velocidad de propagación c del helio es mucho más alta que los 330 m/s del aire.

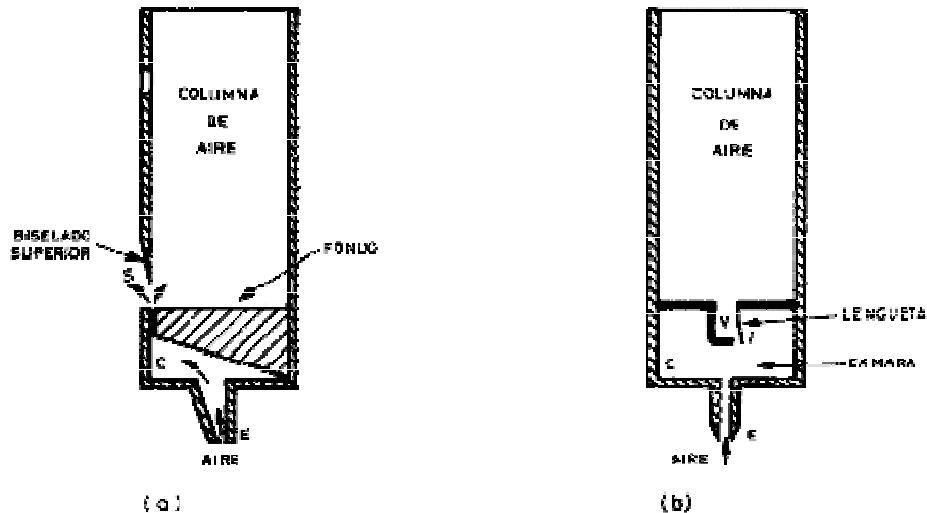
II. La frecuencia del sonido producido por un tubo, tanto abierto como cerrado, es inversamente proporcional a la longitud del tubo.

A mayor longitud del tubo, más grave es el sonido, es de frecuencia menor.

III. A igualdad de longitud entre un tubo abierto y otro cerrado, el abierto produce un sonido de frecuencia doble que el cerrado, es decir, el abierto produce un sonido a la octava del cerrado.

IV. Los tubos abiertos producen la serie completa de armónicos, mientras que los cerrados sólo los armónicos de frecuencia impar de la fundamental.

Se puede hacer otra división de los tubos atendiendo a la forma de producir la vibración:



a) embocadura de flauta

b) embocadura de lengüeta.

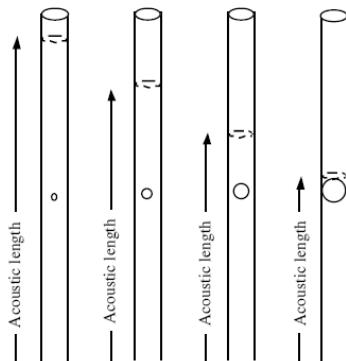
a) Tubos de embocadura de flauta: en estos tubos, el aire que procede del fuelle, penetra a través de la embocadura a una velocidad c , de donde pasa a la columna de aire a través de un orificio L llamado luz, encontrándose con la boca del tubo y chocando con el labio superior S en forma de bisel, originando unos torbellinos que dan lugar a que el chorro de aire unas veces se dirija hacia el exterior y otras hacia el interior del tubo, apareciendo las vibraciones propias del mismo. El extremo opuesto a la embocadura puede ser abierto o cerrado.

b) tubos de embocadura de lengüeta: el aire que penetra por la embocadura llega a la cámara C, de tal forma que para pasar el tubo, tiene que hacerlo a través de la ventana V, delante de la cual se encuentra una lengüeta I, generalmente metálica. Si se trata de un tubo de lengüeta batiente, ésta es un poco mayor que la ventana y en su posición de equilibrio queda como se indica en la figura, pero debido a la corriente de aire puede llegar a tapar por completo la ventana hasta que por su elasticidad, vuelve a dejar paso libre, y así se crea la vibración. En los tubos de lengüeta libre, ésta es menor que la ventana y su posición de equilibrio es la que coincide con la ventana, aunque por su tamaño nunca la cierra por completo, por lo que la vibración que en ella produce el aire, origina modificaciones de presión en el tubo y la consiguiente emisión de sonido.

Generación de las diferentes notas

Generalmente, los instrumentos de viento poseen un único tubo sonoro (a excepción del órgano), por lo que para poder generar las diferentes notas se recurre a diversos artificios con la finalidad de variar la longitud de la columna de aire. Los procedimientos para llevar a cabo esta variación son básicamente dos.

El primero consiste en perforar a lo largo del tubo una serie de orificios de tamaño y posición convenientes. Estos agujeros se pueden tapar, bien con los dedos (flautas) o con llaves (saxófonos, clarinetes, etc.).



Un segundo método consiste en añadir porciones de tubo que se conectan al principal mediante pistones (trompeta), o llaves (trompa) o tubos deslizantes (trombón de varas).

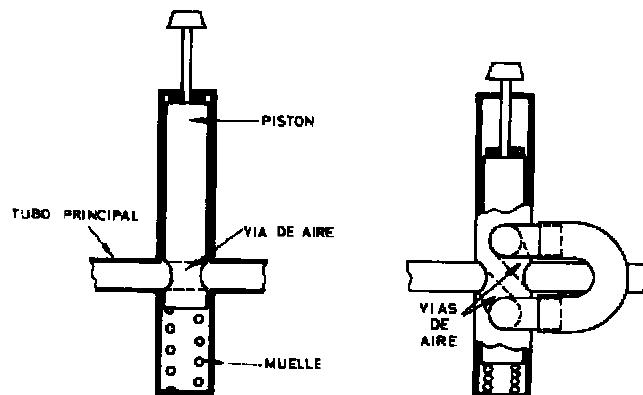


Figura 23: Sección transversal de una trompeta

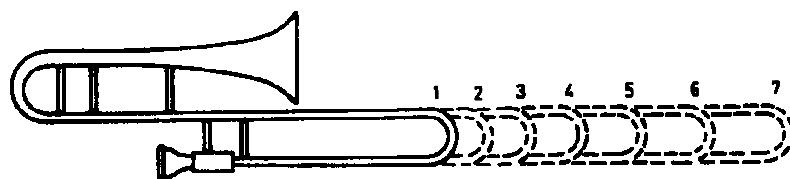


Figura 24: Diagrama del trombón de varas

Armónicos y diferentes tipos de taladros

En música se denomina taladro al agujero del tubo sonoro.



En una flauta (arriba) el taladro está abierto por los dos extremos, por lo que en estos, la presión del aire será muy similar a la atmosférica y éste podrá moverse libremente. Dentro del tubo la presión podrá ser mayor o menor. En un clarinete (figura del medio) el taladro es casi cilíndrico. Un oboe (abajo) éste tiene forma cónica al igual que en los saxofones. También existen algunos tubos de órgano con forma prismática.

Cómo es posible el clarinete, teniendo la misma longitud que la flauta, toque casi en una octava por debajo. Además, el oboe es parecido al clarinete y sin embargo, su rango está cercano al de la flauta.

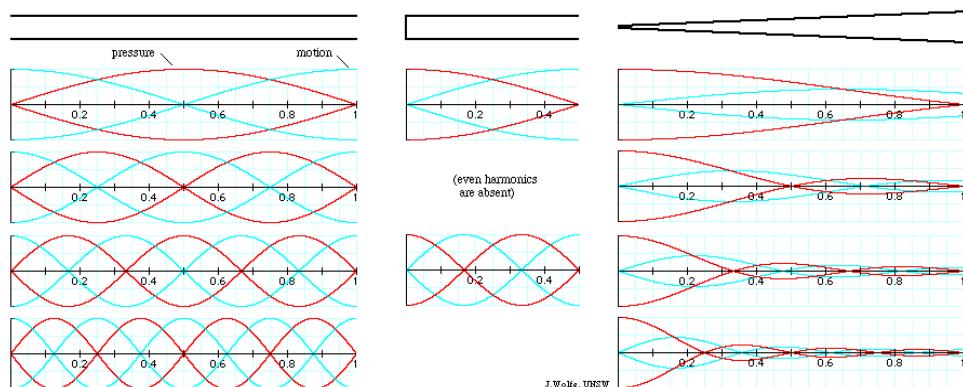


Figura 25: Los gráficos muestran los patrones de onda estacionaria en tres columnas de aire simples: un cilindro abierto (flauta), un cilindro cerrado (clarinete) y un cono (oboe). Las líneas rojas representan la presión del sonido y las azules el desplazamiento del aire. En todos los diagramas la longitud de onda es la misma, aunque en el tubo cónico la forma diste mucho de la obtenida para el resto.

El diagrama de arriba muestra los diferentes patrones de vibración o modos que satisfacen estas condiciones que impone la estructura de la flauta: como los extremos están abiertos, en ellos se producirán vientos. El gráfico superior es el patrón de una onda cuya longitud de onda es el doble que la longitud de la flauta,

L , (primer armónico, f_1), el segundo gráfico corresponde a una longitud de onda $2L/2$ (segundo armónico, f_2), el tercero a $2L/3$ (tercero, f_3) y así sucesivamente...

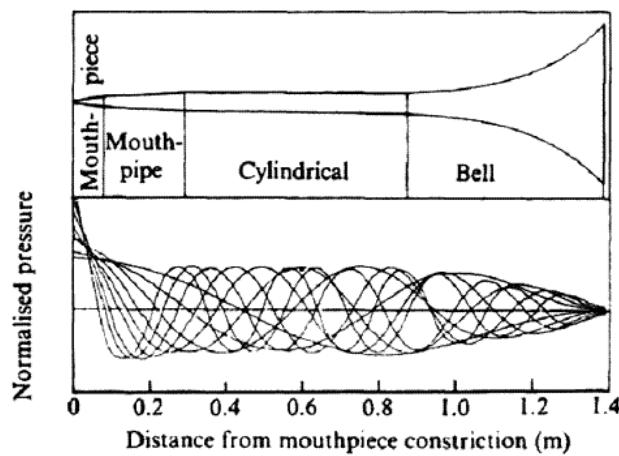
En realidad, se ha simplificado un poco ya que el nodo de presión está ligeramente desplazado fuera del tubo. Es decir, L , la longitud efectiva que debería ser usada para realizar los cálculos, sería algo mayor que la longitud real del tubo. Este efecto del final del tubo es aproximadamente se cuantifica como 0.6 veces el radio de la abertura.

Los instrumentos de embocadura, en el extremo por donde músico coloca su boca, no están abiertos, es decir, el aire no puede desplazarse libremente y en dicho lugar aparecerá un nodo. Consideremos el clarinete: es prácticamente cilíndrico y está abierto en la campana de salida, pero cerrado en la embocadura por la boca. Como ya hemos comprobado en el diagrama que aparece en el centro, el clarinete sólo produce los armónicos impares. Esta es la causa por la que puede tocar una octava por debajo de lo que lo hace una flauta de la misma longitud.

Influencia del grosor del instrumento

La presión en el interior del instrumento depende del diámetro de éste. Por tanto, el área de la embocadura es, más sensible a las variaciones de presión que el área de la campana. Esto enfatiza la importancia del elemento inicial con respecto al resto del instrumento.

El diagrama de abajo muestra cómo se distribuye la presión de los nueve primeros armónicos de una trompeta.



6.2.3 Clasificación de los Instrumentos de Viento

Clasificación General

Podríamos realizar una clasificación en dos grandes grupos teniendo en cuenta el material del que están fabricados: tubos de madera y tubos de metal.

Tubos de Madera

Como se ha estudiado anteriormente, en todos los instrumentos de viento se genera una onda estacionaria longitudinal en su interior, y para producir esa onda se necesita una fuente sonora. Ésta puede ser de dos tipos, atendiendo a la cual se forman dos grandes grupos de instrumentos de viento:

- a) La flauta y sus derivados, que utilizan una corriente de aire oscilante.
- b) El clarinete y sus derivados, que utilizan las vibraciones mecánicas de una pequeña pieza de material elástico, la lengüeta. Dentro de este grupo se pueden distinguir:
 - b.1) Los que tienen una lengüeta simple, tales como el clarinete y el clarinete bajo.
 - b.2) Los de doble lengüeta, como el oboe, corno inglés, fagot y contrafagot.

A continuación se describe brevemente algunos de estos instrumentos musicales.

La flauta y sus derivados

Antiguamente las flautas se hacían de madera, pero ahora generalmente se construyen con metales como el platino, oro, plata y diversas aleaciones. Las flautas de plata poseen un sonido brillante y las de platino son preferidas por algunos flautistas, ya que la alta densidad de este metal las hace menos sensibles a las variaciones de temperatura. Las de oro suelen ser poco brillantes.

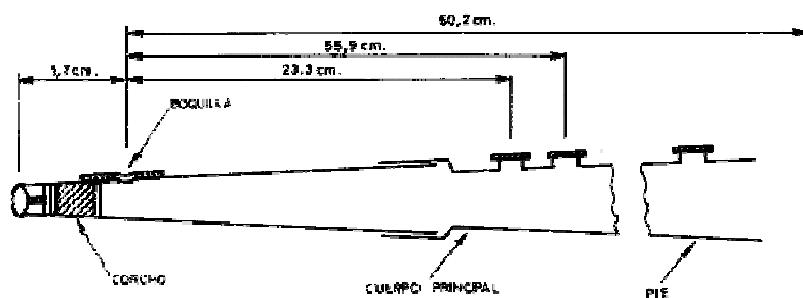


Figura 26: Sección transversal de una flauta

Supongamos que tenemos el tubo de la figura anterior, al cual le insuflamos una corriente de aire bajo presión, que no se divide en dos, como se podría suponer, sino que empieza a vibrar a los lados del material de la cuña constituyendo la fuente productora de ondas sonoras. La frecuencia del sonido emitido dependerá de la distancia de la hendidura a la cuña y de la velocidad del aire suministrado.

Al soplar por el extremo libre de la embocadura, la columna de aire entra en vibración y produce un tono determinado, cuya frecuencia de oscilación viene determinada por la de resonancia. La frecuencia de resonancia del sistema es de un valor muy próximo a la del tubo. La resonancia del sistema mantiene constante la frecuencia para pequeñas variaciones de la velocidad de la corriente de aire, no obstante, si ésta velocidad aumenta considerablemente, el sistema resonará con el primer múltiplo de esa frecuencia; cuando se logra esto, se dice que el tono se ha producido por sobre-soplado.

El cuerpo de la flauta popular consta de tres secciones:

- a) boquilla o cabeza, conteniendo el agujero de la boca y una lámina de corcho para el perfecto ajuste de la pieza.
- b) cuerpo principal, con la mayor parte de las teclas o llaves de trabajo.
- c) pie con la llave para el meñique de la mano derecha.

La columna de aire del instrumento es cilíndrica con un diámetro aproximado de 1,9 cm, excepto en la boquilla, donde es cónica, con un diámetro en la parte más estrecha de 1,7 cm. La máxima longitud es de 67 cm, un tubo abierto de esa longitud tiene una frecuencia de resonancia correspondiente al DO#4 pero debido a la constitución práctica de la flauta, la nota real más baja producida es DO4. La flauta en SOL es aproximadamente tres veces más larga que la convencional y suena una cuarta más baja, en cambio, el píccolo o flautín es la mitad de largo, y suena una octava más alto (más agudo), siendo su sonoridad muy brillante.

El Clarinete

El clarinete tiene una sola lengüeta de caña y se fabrica de madera, siendo el tubo casi cilíndrico. La columna de aire del tubo permite mantener la vibración producida en la lengüeta y hace que su frecuencia de vibración coincida con la frecuencia de resonancia de la columna. El resto del mecanismo acústico es similar al de la flauta, ya que se consiguen las diferentes notas alargando o acortando el tubo, cerrando o abriendo los agujeros.

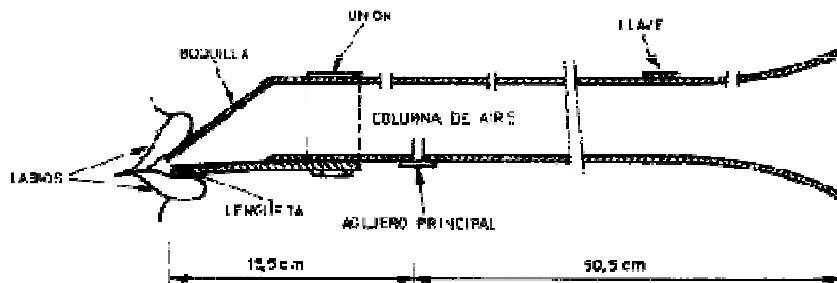
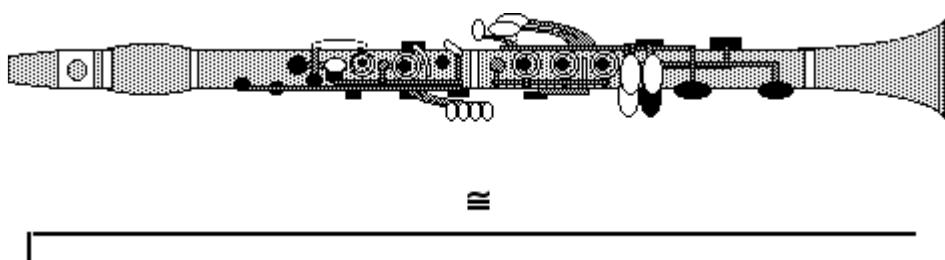


Figura 27: Sección transversal de un clarinete

Existe una diferencia notable entre la escala del clarinete y la de la flauta, por el hecho de estar cerrado el tubo por un extremo, la columna de aire vibra según los modos impares del fundamental, por lo que el segundo modo de vibración es de una frecuencia triple a la del fundamental, que musicalmente equivale a una octava más una quinta.



La longitud del clarinete es de alrededor de 66 cm, así para la nota más baja del registro es en la llave que se encuentra alrededor de 22 cm a partir del extremo inicial, mientras que la nota más alta, tiene el registro en el agujero abierto a 25 cm, desde la embocadura. Su máxima radiación energética se realiza a través de los agujeros.

En este instrumento los registros más agudos suenan claros y expresivos, pudiendo comparársele al violín, siendo su sonido áspero en los graves y de gran belleza en los agudos.

El Oboe, el Fagot y el Corno Inglés

El oboe y el fagot, son básicamente tubos con columnas de aire cónicas en los que un extremo ha sido cortado para introducir una lengüeta doble, consistente en dos mitades de caña que se golpean una con otra. La columna cónica vibra con los modos impares, sin embargo tienen un sobre-soplado de una octava.

El oboe es un cono recto hecho esencialmente de tres piezas de madera, todas con sus correspondientes llaves denominadas, inferior, superior y campana. La

lengüeta se une a una pieza cónica de metal llamada horquilla, que se inserta en la parte superior. Las piezas superior e inferior tienen seis agujeros para la escala básica, que se extiende desde RE₄ hasta DO₅. Los agujeros y llaves adicionales en la pieza inferior y la campana permiten llegar hasta SI_{3b} por debajo y hasta DO₆ por arriba. Como la frecuencia fundamental del cono completo es la misma que la de un tubo abierto de la misma longitud, el oboe tendrá un tono fundamental similar al de la flauta y una octava más alta que el del clarinete.



El fagot está constituido por un cono con una longitud total de 254 cm, curvado para reducir sus exageradas dimensiones. El extremo del fagot está formado por una pieza de metal rematada en punta, llamada boquilla, que tiene un diámetro de unos 4 mm, donde va colocada la lengüeta. La boquilla se dobla primero hacia arriba y luego hacia abajo y está insertada en una unión volada hecha de madera que tiene tres agujeros en la escala básica. Estos agujeros están demasiado separados para una misma mano, por lo que la madera se espesa formando un ala y se perforan los agujeros en oblicuo. La bota, sección de madera donde está colocada el ala, tiene tres agujeros en la parte de abajo para la mano derecha. Una pieza metálica con forma interna de "U" ensambla la parte de abajo de la bota con el resto del instrumento. Por último, en la parte de arriba de la bota va encajada la campana, que consigue ese tono metálico característico del fagot. En el extremo de la campana, el diámetro interior del tubo se ha incrementado en 4 cm. La escala básica del fagot se extiende desde el SOL₂ al FA₃ alrededor de la mitad de la longitud total del instrumento se utiliza solamente para producir notas por debajo del SOL₂ hasta llegar al SI₁. Su sonido es sin brío y burlón, de rica expresividad y sonoridad, con un tratamiento acústico de poca reverberación. El sobre-soplado eleva una octava el tono, produciendo notas desde el SOL₃ al RE₄.



Existe otro tamaño de fagot que suena una octava más bajo que el normal, se denomina contrafagot. Este instrumento tiene una sonoridad rica y grave, sobre todo en registros bajos.

El corno inglés es un oboe que genera una quinta más baja, con una sonoridad más llena.

Tubos de Metal

En este grupo se encuentran las trompetas, trompas, trombones, tubas, tubas wagnerianas, saxofones, sarrusofones, tubos de órgano metálicos, cor de chasse francés y las trompas guerreras africanas.

Desde el punto de vista acústico, los instrumentos de metal se clasifican dentro de los de viento, pero las diferencias con los de madera son muy importantes. Las diferencias más importantes son:

- a) Para obtener las notas que existen entre los modos consecutivos, los instrumentos de metal emplean llaves que alargan o acortan la columna de aire o añadiendo o retirando piezas de tubo, al contrario que en los de madera, donde se tapaban o destapaban agujeros.
- b) En lugar de mantener las vibraciones mediante lengüetas o corrientes de aire, se hace a partir de las vibraciones de los labios del músico.
- c) Los instrumentos de metal utilizan muchos más modos de resonancia de la columna de aire que los de madera, es más, algunos sólo utilizan los distintos modos para alcanzar diferentes notas, sin poseer un teclado accesorio.

Las trompetas, trompas, trombones y las tubas se componen de cuatro elementos:

- a) la boquilla,
- b) el tubo extendido a lo largo del instrumento con sus partes cilíndrica y cónica,
- c) las válvulas, y
- d) el pabellón, que es la parte ancha abierta al extremo opuesto de la boquilla. El tamaño y forma del pabellón influye en el timbre del instrumento.

El trombón por lo general no tiene válvulas y su vara hace alargar o acortar la longitud del tubo. Los trombones bajos, en su mayor parte, además de la vara que prolonga el tubo y ayuda a conseguir los sonidos más graves, poseen una válvula.

La boquilla es una pequeña copa con un reborde para acomodar los labios, esta copa está conectada a un tubo de pequeño diámetro en relación con el resto del instrumento. En las bajas frecuencias la boquilla presenta una distorsión en el tono real producido por los labios, ya que cuando las ondas tienen mayor longitud en comparación con el tamaño de la boquilla, ésta introduce un pequeño alargamiento en el tubo. En frecuencias altas, sin embargo, no existe este problema y la boquilla prácticamente no introduce variación en la nota producida por el instrumento.

La colocación de la campana en el extremo final de los instrumentos de metal está justificada para obtener los modos altos de vibración de la columna de aire. La campana consiste en un incremento progresivo del diámetro en el final del tubo, lográndose un aumento en la producción de armónicos, por lo que la adición de la campana influye de una manera notable en la parte alta de la respuesta en frecuencia, y su forma exponencial proporciona una radiación óptima.

El Saxofón

El saxofón puede ser considerarlo un instrumento híbrido, pues consta de una boquilla con una lengüeta simple, como el clarinete y de un tubo cónico de metal como el fagot. El sobre-soplado eleva el sonido una octava como en el oboe y el fagot, mientras que el teclado es similar al del clarinete.



Existen cinco tipos clásicos de saxofón, siendo los dos más comunes, el soprano y el bajo, con las notas más bajas LA₃ y LA₁ respectivamente. El bajo hace una curva muy pronunciada mientras que el soprano es totalmente recto.

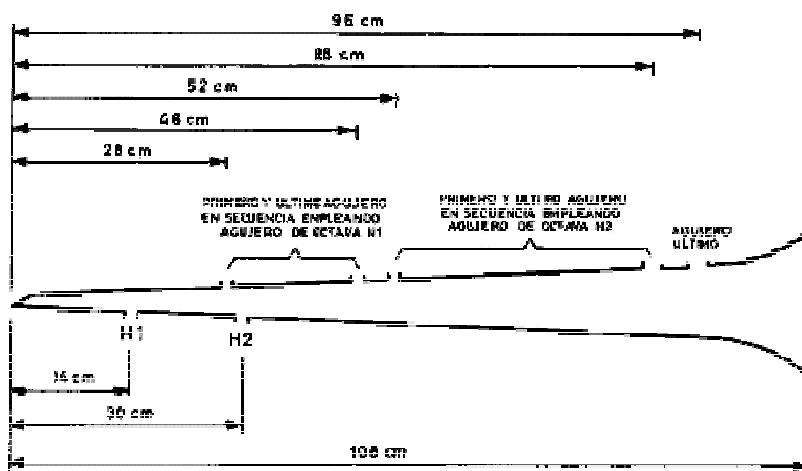


Figura 28: Sección transversal de un saxofón alto

Cuando un instrumento de madera se toca, lo que se oye es el sonido radiado, no la onda estacionaria en su interior. La opinión generalizada de que el sonido creado en la boquilla viaja a través de todo el tubo, para finalmente salir por la campana, es totalmente falsa. La campana de un instrumento no trabaja en ninguna nota excepto cuando todos los agujeros principales están tapados (las dos notas más bajas). Para demostrar esto, se puede suprimir la campana de un clarinete, por ejemplo, sin notar una diferencia apreciable a lo largo de toda una ejecución musical. De igual manera, la campana de un fagot puede suprimirse sin cambio aparente para las notas altas. Todo este razonamiento no sirve para los instrumentos de metal, en los cuales todo el sonido proviene de la campana para todas las frecuencias.

La Trompeta

La trompeta, se puede considerar como el instrumento generatriz de todo el grupo de metal, como la flauta en la madera. La longitud total aproximada del tubo es de 137 cm, formando una vuelta completa. El diámetro interior del tubo es de 1,1 cm en la boquilla y de 11 cm en la campana. Aunque existen varios modelos de trompetas, el más generalizado es el de Sib. Para los tonos que quedan entre armónicos consecutivos, se utiliza un teclado compuesto por tres válvulas convirtiéndose en un instrumento cromático. El tubo es cilíndrico en los 2/3 de su longitud y cónico en el 1/3 restante.

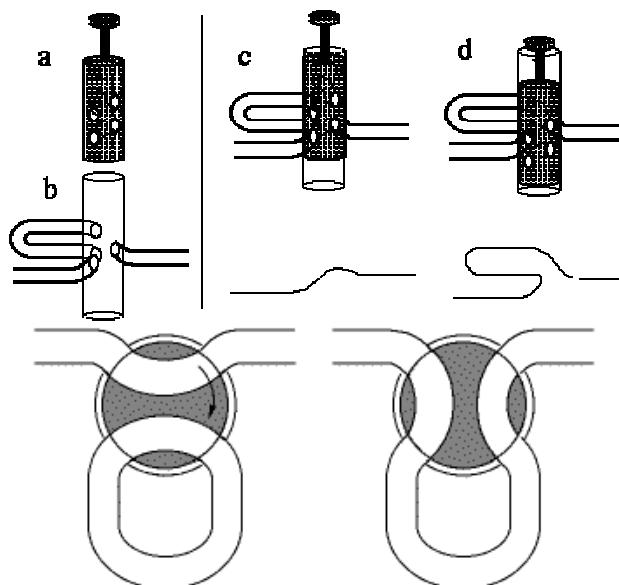


Figura 29: Ilustración del mecanismo de las válvulas en una trompeta

El Trombón

El trombón es un instrumento que difiere de la trompeta en la manera de conseguir las distintas longitudes del tubo sonoro. El incremento de longitud se logra en el trombón con una pieza en forma de "U" que alarga la curva de la vuelta completa. El diámetro interior varía desde 1,3 cm en la boquilla, hasta 20 cm en el extremo de la campana, ocupando ésta una tercera parte de la longitud total del trombón, siendo por tanto, un tubo cilíndrico que termina en forma de pabellón, con una embocadura cóncava. Existen dos modelos muy utilizados: el Slb (tenor) y el bajo (SOL) no resonando ninguno por encima del octavo modo.

Las notas se producen al mover la corredera a lo largo del tubo principal. La corredera es un tubo móvil que se desliza sobre el tubo principal, según se deseé, y que por tanto, permite variar su longitud. Se puede comparar con el violín, ya que en los dos casos, los ejecutantes, tienen que conocer de oído las posiciones correctas de las notas. El timbre del trombón es potente, con un registro bajo, más lleno y fuerte que en el caso de la trompeta.

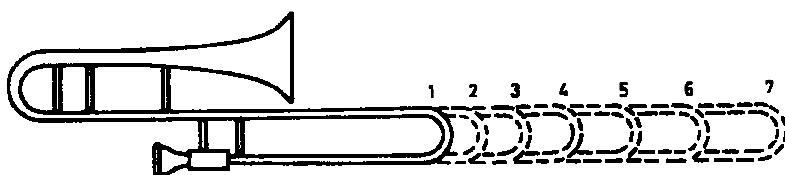


Figura 30: Diagrama del trombón.

El trombón tiene dos inconvenientes, uno es que el ejecutante tiene que hacer un breve silencio entre notas, durante los que cambia con rapidez la posición de la vara, para preparar la emisión de la siguiente nota. El segundo problema es la dificultad que tiene para realizar pasajes rápidos por lo expuesto anteriormente.

Los instrumentos de metal generan una potencia acústica sólo superada por los de percusión. En un fortísimo es el metal el que puede enmascarar el resto de los grupos de instrumentos de una orquesta sinfónica, sin embargo, las ondas estacionarias en el interior de los instrumentos de este grupo son similares a las de madera.

Los sonidos producidos en la boquilla de una trompeta y de un clarinete tienen tan sólo una diferencia de unos 6 dB, pero el sonido final emitido en uno y otro difieren en varias decenas de dB, esto es debido al efecto de la campana (en todas las frecuencias en la trompeta y sólo para las muy altas en el clarinete) y a la gran direccionalidad del metal.

La Trompa

La trompa está formada por un tubo largo y estrecho de forma cónica enrollado hasta terminar en un pabellón abierto, con una embocadura de forma cónica.



Como ya se ha comentado, en estos instrumentos la producción sonora está controlada por los labios del intérprete, que actúan como una lengüeta doble, cuando el intérprete hace presión con ellos sobre la embocadura. Variando la presión de los labios y la fuerza del soplo, se pueden producir un número limitado de notas, resolviéndose esta limitación mediante el mecanismo de válvula, que permite variar la longitud de la columna de aire dentro del tubo principal de la trompa. Este mecanismo cierra y abre la circulación de aire según lo deseé el ejecutante, dentro de unas piezas adicionales que se encuentran en el tubo principal de este instrumento.

La trompa tiene tres válvulas que controlan la emisión sonora de los tres tubos adicionales (de diferente frecuencia), permitiendo tocar la escala cromática casi completa.

Se puede cambiar el timbre, mediante uno elemento auxiliar como es la sordina, que reduce la sonoridad y cambia el timbre del instrumento. Esto se puede obtener también introduciendo la mano dentro de la trompa, con lo que se acorta la longitud del tubo, elevando por lo tanto un semitono la nota.

La Tuba

Uno de los instrumentos de viento que produce señales más graves, entre los de metal es la tuba, formada por un tubo cónico y el mecanismo de válvulas de la trompa con la embocadura cóncava. Para poder generar la escala cromática completa, posee cuatro o cinco válvulas.



El órgano

Cada órgano posee un número muy elevado de tubos que son accionados con aire mediante un teclado. La parte baja de esos tubos se relaciona con lo que habíamos llamado boquilla (también los hay de lengüeta y de corriente de aire oscilante). De esta manera un tubo de órgano está esencialmente constituido por dos piezas muy diferenciadas, la inferior productora de un tono y la superior, de considerable mayor longitud, resonadora.

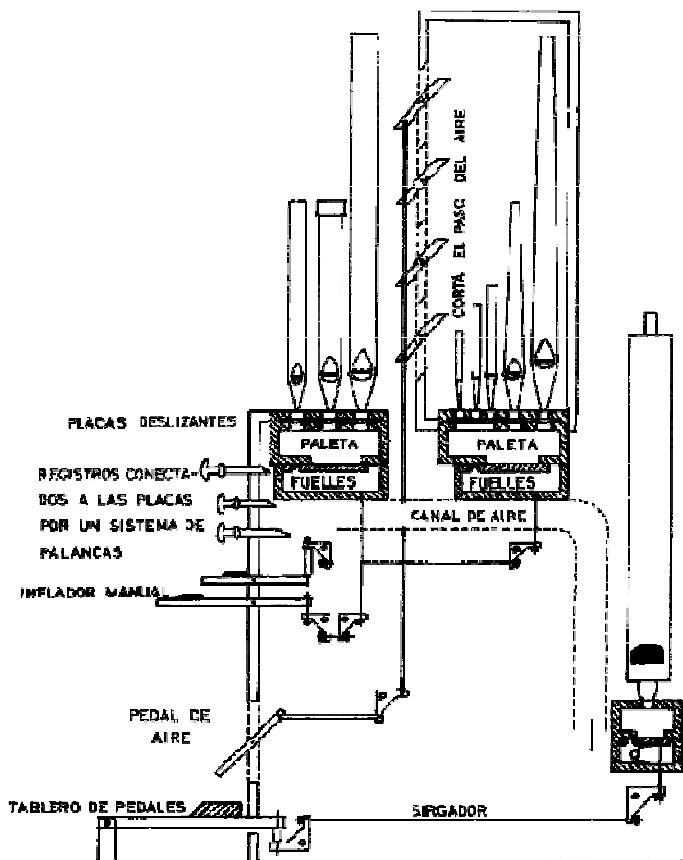


Figura 31: Diagrama de un órgano.

Debido a la gran cantidad y al tamaño de los tubos, es necesario insuflar el aire impulsado hacia los tubos deseados a través de una caja de distribución mediante mecanismos especiales ayudados por fuelles. Al apretar una tecla, el aire del canal se introduce en el tubo correspondiente, que se cierra, por medio de un resorte, al cesar la presión sobre la tecla. Con el fin de conseguir todos los tonos deseados, se necesitan todos los tipos de tubos: abiertos, cerrados, semicerrados, con embocaduras, lengüetas, diapasones y orificios laterales. Los tubos son generalmente de estaño, con una longitud que varía desde unos centímetros hasta varios metros.

6.3 Los Instrumentos de Percusión

6.3.1 Introducción a los Instrumentos de Percusión

Se definen como instrumentos de percusión a todos aquellos cuya superficie resonadora es golpeada, sacudida o frotada por el ejecutante. El origen etimológico de la palabra percusión procede del verbo latino percutere, que significa golpear, batir. Sin dudas, es en este tipo de instrumentos donde mejor se manifiesta la relación causa-efecto, pues es el mismo golpe el responsable directo de la producción del sonido.

Aunque los instrumentos de percusión no son capaces de aportar melodía al conjunto orquestal, su contribución rítmica y colorista es muy importante.

6.3.2 Principios de Funcionamiento de los Instrumentos de Percusión

Vibración de barras o varillas

Las varillas que son cuerpos rígidos de notable longitud con relación a sus restantes dimensiones, sólo necesitan de un punto de apoyo para poder vibrar, pudiendo hacerlo longitudinalmente, transversalmente, o con vibraciones de torsión, aunque desde el punto de vista musical, sólo nos interesarán las dos primeras formas de vibración.

Si la varilla se fija en un extremo y se golpea ligeramente en el otro, entrará en vibración, sin originarse ninguna flexión secundaria, por lo que sólo emitirá la frecuencia fundamental sin armónicos y según vaya disminuyendo la amplitud de la vibración se apagará el sonido. Esta es la base sobre la que se fundamenta el diapasón, que produce un sonido de frecuencia constante, exento casi por completo de armónicos. Es por esto que este instrumento se utiliza como patrón de frecuencias para la afinación de los demás instrumentos.

En todos los instrumentos de varillas, la fuente sonora emite sólo las notas fundamentales, aunque en forma de onda amortiguada. Esto supone la superposición de las notas que se van produciendo con la vibración que se amortigua de las notas anteriores. Esta superposición de sonidos, con frecuencias acordes, producen un efecto auditivo análogo al de los sonidos armónicos, obteniéndose el timbre. Como es lógico, también influye la materia de que esté formada la varilla.

En el caso de las vibraciones longitudinales a través de las varillas se pueden producir sonidos de un tono definido, siendo la frecuencia de la vibración inversamente proporcional a su longitud. Si consideramos una barra de longitud L rígidamente fija en sus extremos o libre en los mismos, las frecuencias de los modos de vibración son:

$$f_n = \frac{n}{2L} c \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

donde c es la velocidad del sonido en la barra, siendo los sobretonos armónicos.

En cuanto a las vibraciones transversales de las varillas, están regidas por las leyes opuestas a las anteriores, pues el número de vibraciones del sonido fundamental producido por una varilla asimétrica que vibra es inversamente proporcional al cuadrado de su longitud. En el caso de las vibraciones transversales de las varillas simétricas, que es el tipo de las varillas empleadas en los xilófonos, también influye el número de vibraciones del sonido fundamental, y varía inversamente al cuadrado de la longitud de la varilla.

Lo normal es que en este tipo de instrumentos, las varillas estén sujetas por un extremo, quedando el otro libre. De este modo, las frecuencias de vibración se obtendrán de la expresión siguiente, que recuerda mucho a la obtenida para los tubos sonoros cerrados:

$$f_n = \frac{(2n - 1)}{4L} c \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

pudiendo comprobar en este caso, que los sobretonos, no guardan una relación armónica con su fundamental.

Por último, los sonidos fundamentales producidos por una misma varilla, según vibre simétrica o asimétricamente, son distintos; en el primer caso es más agudo, manteniéndose en una proporción de 25/4 con relación al segundo.

Por lo tanto, podemos concluir que cuando las varillas vibran longitudinalmente, lo hacen como los tubos sonoros abiertos, si son simétricas (sujetas por un sólo punto situado en su centro), y como los tubos sonoros cerrados, si son asimétricas (sujetos por dos puntos equidistantes del centro y asimétricos).

Vibración de membranas

La vibración de membranas, se basa en los mismos principios que la vibración de cuerdas, ya que son materiales elásticos tensados. La diferencia, es que mientras la cuerda es una línea de puntos vibrando, la membrana es una superficie, y los puntos nodales de la cuerda se transforman en líneas nodales en la membrana; por consiguiente las ondas lineales en la cuerda, son de tipo superficial en la membrana, por lo que las ondas estacionarias son de tipo bidimensional.

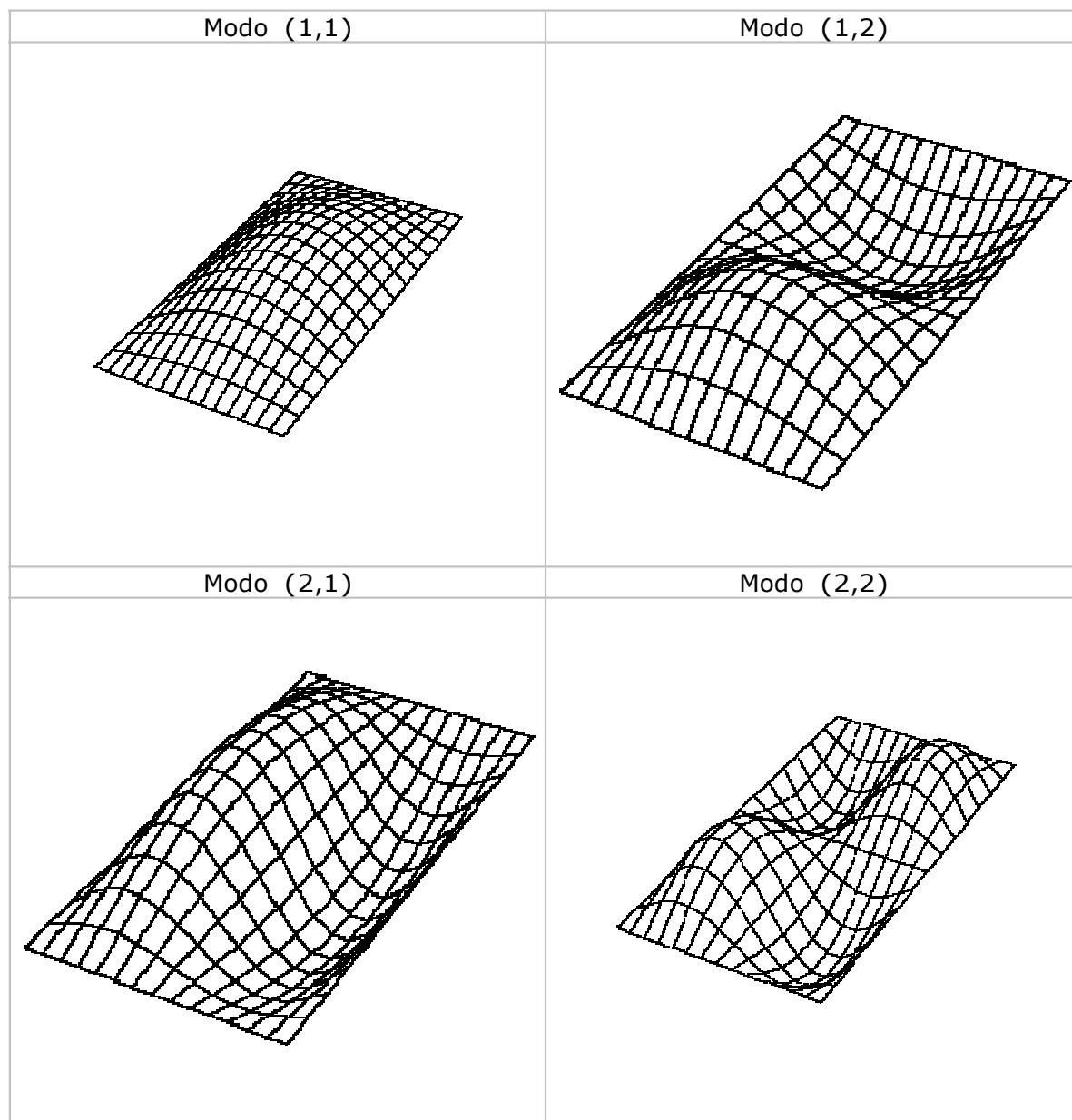
En las membranas ideales vibrantes, los modos de vibración no son armónicos del fundamental, por lo que no resultarán muy agradables al oído, presentando varias dificultades para conseguir las diferentes notas, como es que no se pueden variar sus dimensiones, resultando difícil modificar la tensión a la que está sometida.

La expresión de las frecuencias de los modos de vibración de las membranas rectangulares es la siguiente:

$$f_{\text{rect}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

donde c es la velocidad del sonido en la membrana L_x y L_y las longitudes de los lados de la membrana rectangular.

A continuación se muestran unas animaciones con algunos de los modos de vibración de una membrana rectangular:



La frecuencia fundamental se obtiene al sustituir $n_x = 1$ y $n_y = 1$, siendo los sobretonos correspondientes a $n_x = n_y$ armónicos del fundamental, mientras que para $n_x = n_y$ no lo son.

En el caso de las vibraciones transversales de las membranas circulares, los sobretonos no son armónicos del fundamental.

A continuación se muestran dos imágenes reales de los modos de vibración de un timbal, la primera obtenida mediante el Método de Chladni y la segunda mediante interferometría con haces láser:



Vibración de placas

La diferencia fundamental entre las vibraciones de una membrana y las de una placa delgada consiste en que en una membrana la fuerza recuperadora se debe por completo a la tensión aplicada a la membrana, mientras que en una placa delgada la fuerza de recuperación se debe por completo a la rigidez de la propia placa y no a la tensión aplicada en el golpe.

Las placas vibrantes pueden hacerlo transversalmente y dependiendo de la forma de sujeción, sus modos de vibración son sobretonos que no son armónicos del fundamental.

Las vibraciones de campanas podemos aproximarlas a las de placas, siendo producidas estas al golpearlas con el badajo. Se dan dos tipos de vibraciones:

a) Vibraciones circulares: la campana conserva su forma de revolución, y sólo cambian los radios de las secciones perpendiculares al eje de simetría. Desde el punto de vista acústico tienen escaso interés.

b) Vibraciones radiales: en este caso, la sección transversal de la campana pierde temporalmente su forma circular, para adquirir geometrías ligeramente elípticas. Los modos de vibración poseen líneas nodales meridianas, debido a la variación periódica de los radios.

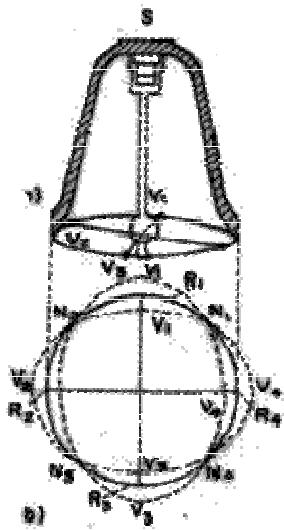


Figura 32: Modo fundamental de vibración de una campana.

En el modo fundamental de vibración, la base de la campana mantiene un perímetro constante, pero su forma varía (la curva de la base varía entre las formas extremas V_1 v_2 V_3 v_4 y v_1 V_2 v_3 V_4 , y los puntos N_1 N_2 N_3 y N_4 no experimentan desplazamiento en la dirección del radio) Las curvas trazadas en la campana forman cuatro líneas nodales, que permanecen en la superficie primitiva de la misma en reposo durante su vibración, siendo el desplazamiento radial máximo, encontrándose siempre el punto golpeado por el badajo en la línea nodal.

El sonido producido por una campana depende de sus dimensiones, del espesor de la parte inferior de la misma, del peso y de su estructura metálica. Influuye también sobre el sonido la forma de suspensión y la posición del centro de gravedad, así como el peso del badajo.

Una regla empírica utilizada por los fabricantes de campanas es que la frecuencia de una campana es inversamente proporcional a la raíz cúbica de su peso.

Además, se intenta que los parciales tercero y cuarto formen un acorde perfecto mayor con el fundamental, y que el quinto sea la octava del fundamental.

6.3.3 Clasificación de los Instrumentos de Percusión

Introducción

Una primera clasificación, desde el punto de vista musical, podría ser:

- a) Instrumentos de entonación definida: su sonido produce sensación de tono (por ejemplo: los timbales, el xilófono, las campanas.)
- b) Instrumentos de entonación indefinida: no producen tonos definidos, sino más bien ruido (por ejemplo: el bombo, los platillos, el tambor)

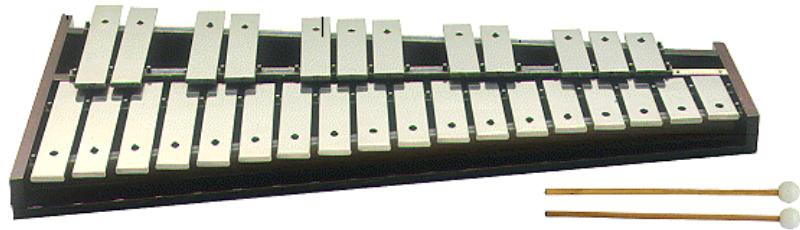
Pero desde el punto de vista estructural, podemos realizar la siguiente clasificación:

- a) De membrana: tambor, timbal, bombo...
- b) De placas: platillos, gong, crótales...
- c) De barras: xilófono, celesta...

Instrumentos Musicales de Barras y Placas

A este grupo pertenecen los idiófonos, en los que el sonido es producido por la materia misma del instrumento, gracias a su solidez y elasticidad, sin que se tenga el recurso a la tensión de membranas o de cuerdas. A este grupo pertenecen la lira, marimba, xilófono, vibráfono, campanas, triángulos, platillos, etc.

La lira o glockenspiel, palabra alemana para designar el juego de timbres empleados en las orquestas, es uno de los instrumentos de barras más sencillo, consta de pequeñas láminas de acero en un bastidor, y que en vez de hacerse sonar por medio de pedales, se percute con un martillito.



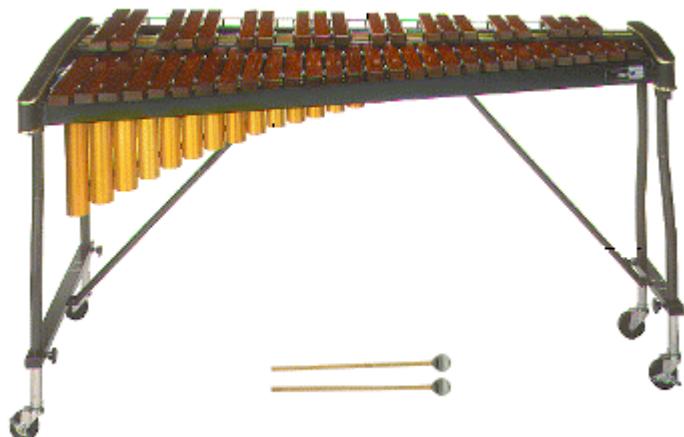
Si se percute una lira, vibra transversalmente a una frecuencia determinada de acuerdo con sus dimensiones, propiedades del metal, y localización de los puntos de suspensión, teniendo sus extremos libres para vibrar.

La marimba, es otro instrumento de barras, aunque diferente de la lira en varios puntos importantes. En el Sur y Centroamérica, México y África, existen primitivas formas de marimbás, que consisten en unas barras de madera (palisandro) o plástico, colocadas sobre cajas de resonancia y golpeadas por diversas clases. Algunas de estas cajas de resonancia están hechas con mitades de cáscaras de coco de diversos tamaños. Estas primitivas marimbás fueron desarrolladas posteriormente hasta obtener las actuales de América latina y el xilófono en Europa.



Cada resonador está cerrado en un extremo y tiene una longitud para resonar en el fundamental de la barra correspondiente. Los resonadores afectan al sonido de dos formas, la primera porque la energía de la vibración de la barra se transfiere eficazmente al aire, el nivel se incrementa y el sonido disminuye más rápidamente. En segundo lugar, el resonador refuerza el fundamental, pero no otras frecuencias, que no sean las frecuencias de resonancia del tubo.

Muchos de los principios que se aplican a la marimba son útiles en el xilófono formado por barras más estrechas que las de las marimbás y son también gruesas.



El vibráfono consiste en una serie de barras metálicas que se apoyan sobre cajas de resonancia afinadas. Las barras son golpeadas con mazas duras o blandas, según la naturaleza de la música. Mediante un dispositivo electrónico se hace vibrar, de manera que se parezca al vibrato de un violín. Su sonoridad posee una calidad bella y aterciopelada, como de campanas y puede ser extremadamente brillante o igualmente delicada.



De todos los instrumentos de percusión de la orquesta, los platillos consisten en dos discos circulares de metal ligeramente cóncavos, con el centro agujereado, para que pase una correa de cuero.

El sonido de los platillos de frecuencia indefinida, se produce al chocar uno con otro, aunque a veces se hace sonar un sólo platillo golpeándolo con uno o dos palillos. Producen un sonido efectista y estridente, necesitando un tratamiento acústico de cierta absorción.



El triángulo es una barra cilíndrica de acero, doblada en dos puntos para formar un triángulo, y abierto por uno de los vértices. Se suspende de un cordón, y el sonido se produce al golpearlo con una varilla de acero o de hierro. El sonido es de frecuencia indefinida muy claro y penetrante.



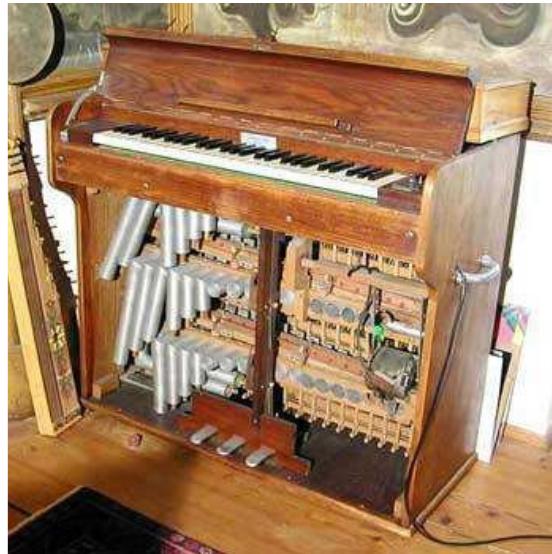
Un buen instrumentista de la percusión estudia la superficie de cada gong y sabe con exactitud en que punto de los mismos obtendrá una determinada clase de timbres, ya que por lo general, existen tres o cuatro calidades sonoras, completamente distintas. Se fabrican con metal forjado para que así su estructura sea densa, y entonces, sus vibraciones se transmitan poderosamente.



En el grupo de las calabazas, se encuentran las maracas de los países latinoamericanos. Un tipo de ellas es una vaina cuyas simientes se han secado. Al agitarse, las pepitas sueltas originan un sonido irregular de frecuencias agudas. Otro de sus tipos, el güiro, consiste en una calabaza larga, estriada a través de su longitud. Se sostiene con una mano, y con un trozo de madera provisto de alambres rígidos, se frota suavemente la calabaza con la otra mano, en una posición de ángulo recto con las estrías. Este instrumento puede lograr un ritmo poderoso, y variando la velocidad de la frotación pueden obtenerse frecuencias muy altas frente a la frecuencia bajas obtenidas por la frotación lenta.



La celesta tiene un teclado como el del piano. Su sonoridad es delicada y se produce por medio de unos macillos ligeros que golpean las barras metálicas colocadas encima de cajas de resonancia.



Las claves son dos palillos cilíndricos y fuertes, hechos de palo de rosa los cuales, golpeados uno contra el otro, producen un sonido claro, penetrante y profundo, haciendo de caja de resonancia el hueco de una mano.



Instrumentos Musicales de Membranas

En este grupo se encuentran los membráfonos en los que el sonido se produce por membranas fuertemente tensadas. Se dividen en tres subgrupos: percutidos, frotados y soplados.

Los timbales son instrumentos de percusión que se afinan y pueden producir unas frecuencias determinadas. Un timbal consiste en una caja semiesférica o semiovalada, hecha de cobre o bronce, con una membrana de pergamino tensa sobre ella y sujetada con un aro de metal, que se ajusta mediante tornillos. El timbalero puede variar la tensión de la membrana y por consiguiente su afinación apretando o aflojando los tornillos.

En teoría la piel es de igual espesor en toda su superficie, pero en realidad existen grandes desigualdades en la misma. Esto hace que sea difícil el conseguir el mismo grado de tensión para toda la superficie. Lo que no sólo dificulta la afinación, sino que da origen a sobretonos, no armónicos de su fundamental irregulares y excéntricos, haciendo que sea así casi imposible el obtener una sonoridad pura y con resonancia. Antiguamente, la extensión del timbal era de una octava, aunque hoy en día su extensión es de unas dos octavas. Con el empleo de los pedales la afinación de cada timbal puede variar con gran rapidez en manos de un buen instrumentista.

Un timbal bien afinado y debidamente percutido, hace que se perciba un tono fundamental fuerte y tres armónicos a intervalos de quita justa, séptima mayor y octava sobre el tono base.



El bombo es un tambor de grandes dimensiones que produce un sonido grave e indefinido, que se origina al golpear el parche con un mazo.

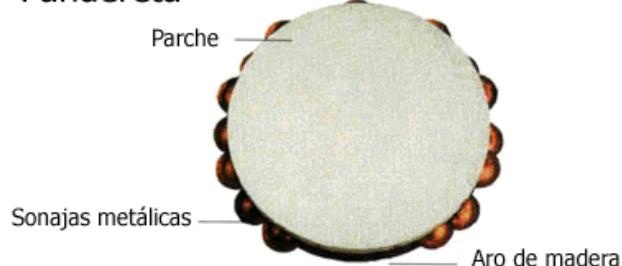


El tambor militar o la caja, tiene dos parches, el superior se bate con los palillos, y el inferior tiene un número de cuerdas dividiéndolo en dos mitades. Cuando se toca este instrumento, el parche inferior vibra, y se agitan fuertemente estas cuerdas o tirantes. Esto aumenta la brillantez fortaleza y duración de cada golpe. Cuando se hace un redoble, hay un intervalo de tiempo entre cada golpe de los palillos rellenado por la vibración de los tirantes, consiguiendo así que el redoble suene continuo. La frecuencia del sonido es indefinida. La caja de frecuencia indefinida es un pequeño tambor de características análogas al tambor militar.



La pandereta es un instrumento de percusión, que consiste en un parche estirado sobre un marco de madera circular, que tiene unas pequeñas plaquitas de metal. El ejecutante golpea la pandereta con la mano.

Pandereta



Los bongos son dos cuencos de madera, de forma cónica con su extremo más pequeño cubierto y el mayor cubierto de una piel tensa. Se tocan con los dedos cerca del borde, algunos de estos instrumentos pueden afinarse.



Los tam-tams son dos tambores, como unos pequeños timbales, que pueden afinarse y se tocan con palillos. A veces el sonido de uno de ellos se amortigua por presión de la muñeca, elevándose así su afinación.



La tumba es un tambor cónico alargado, que se toca con los dedos, posee una sonoridad profunda y de gran alcance.



7. Configuración de los instrumentos musicales de una Orquesta

Introducción

La palabra orquesta procede del griego y significa "lugar para danzar". Esto nos hace retroceder alrededor del siglo V a.C. cuando las representaciones se efectuaban en teatros al aire libre (anfiteatros). Al frente del área principal de actuación había un espacio para los cantantes, danzарines e instrumentos. Este espacio era llamado orquesta.

Hoy en día, orquesta se refiere a un grupo numeroso de músicos tocando juntos, el número exacto depende del tipo de música.

La historia de la orquesta en tanto que conjunto de instrumentistas se remonta a principios del siglo XVI. Aunque en realidad este grupo "organizado" realmente tomó forma a principios del siglo XVIII. Antes de esto, los conjuntos eran muy variables, una colección de intérpretes al azar, a menudo formados por los músicos disponibles en la localidad.

En nuestros días distinguimos:

las orquestas de cuerda, que están compuestas de violines, violas, violonchelos y contrabajos.

las orquestas sinfónicas, compuestas por numerosos instrumentos de viento en madera y en metal, instrumentos de percusión y un grupo de cuerda.

las bandas de música, compuestas de instrumentos de viento en metal, saxofones e instrumentos de percusión y con frecuencia un contrabajo.

las orquestas de armonía, compuestas de los citados instrumentos por grupos de tres, más instrumentos de madera, sobre todo clarinetes,

orquestas de cámara, compuestas de instrumentos de cuerda, aumentadas por algunos instrumentos de viento madera y metal.

las orquestas de uso especial, cuya composición es variable: orquesta de jazz, de salón, de mandolinas, de balalaicas, etc.

Configuración de los instrumentos en una orquesta

Como se puede apreciar por lo expuesto durante todo este estudio, existen una gran cantidad de instrumentos para conseguir la emisión de las frecuencias o notas, de cuya combinación aparecerá la composición musical. Cada instrumento poseerá sus características de intensidad, tono y timbre, a partir de las cuales y del número de instrumentos que forman parte, se podrá determinar: a) la situación en la orquesta para obtener un conjunto equilibrado; b) el estudio acústico del local; c) los dispositivos electroacústicos más convenientes; d) el aislamiento acústico cuando la fuente musical perturbe.



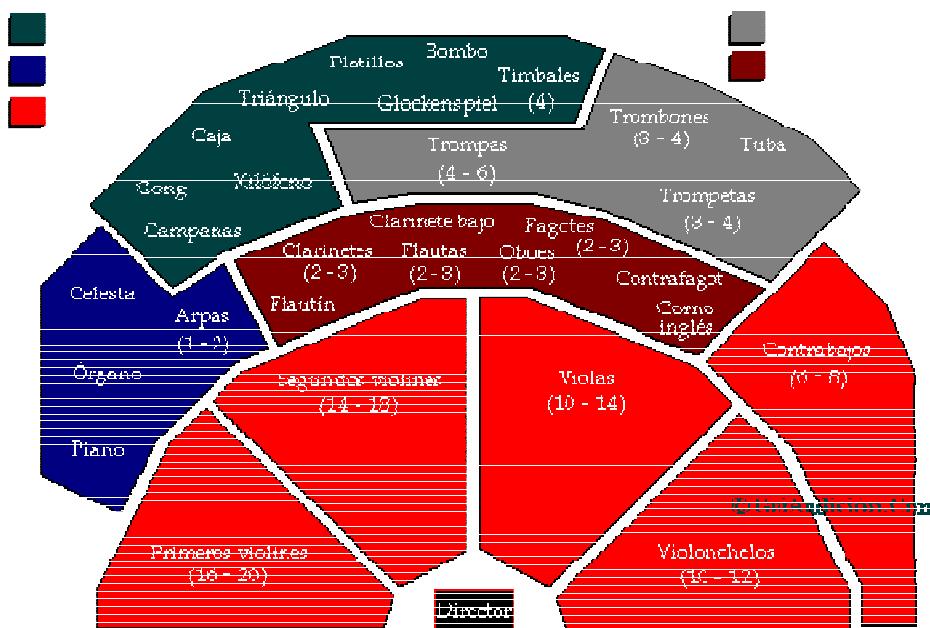
Figura 33: Esquema de colocación de los instrumentos de una orquesta.

La colocación de los miembros de una orquesta varía de acuerdo con los gustos del director. La configuración de una moderna orquesta, no se basa en un número fijo de ejecutantes, aunque suele estar formada de la siguiente forma:

Instrumentos de cuerda	Instrumentos de madera	Instrumentos de metal
30 Violines (primeros y segundos)	1 Flauta	2-4 Trompetas
10 Violas	1 Flautín	3 Trombones
10 Violonchelos	1 Oboe	1 Tuba
4-8 Contrabajos	1 Corno inglés	2 Clarinetes

A esta plantilla orquestal se le añaden tantos instrumentos de percusión como sean necesarios.

Otro esquema típico de colocación de los instrumentos en la orquesta es el siguiente:



8. Proyecto “Diccionario Músico-Ingeniero”

A

A- Letra con la que se designa la nota La en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

ab - Indicación para soltar el pedal, también se utiliza un asterisco.

accelerando - Indica una aceleración gradual del pulso.

accicatura - (aplastar) Adorno que consiste en una o más notas ejecutadas antes de la nota real la cual conserva su acento.

Acento - Intensificación de una pulsación en particular, por ejemplo, cada 3 o 4 pulsaciones, cuando el acento es regular tenemos entonces un compás.

acorde - Combinación de dos o más notas que se ejecutan simultáneamente.

ad lib - (ad libitum) A voluntad. Indica que un pasaje se puede ejecutar con libertad.

adagio - Tiempo lento, aproximadamente entre 66 - 76 pulsaciones por minuto.

alteración - Signo que modifica la altura de una nota subiéndola (#) o bajándola (b) un semitono, o bien restituyendo su altura original.

altura - Cualidad del sonido que determina su posición en la escala.

allegro - Indicación del tempo que se encuentra entre 120 - 168 pulsaciones por minuto.

andante - Indicación del tempo a una velocidad "normal" entre 76 -108 pulsaciones / minuto.

anticipo - Efecto de la armonía en el que una nota de un acorde es ejecutada antes de que se perciba el resto del mismo, creándose una disonancia en el acorde precedente.

apoyatura - Adorno musical y efecto de la armonía en la cual una nota antecede a la nota real, a diferencia de la accicatura esta posee la mitad del valor de la nota real y no debe pertenecer al acorde.

armadura - Indicación de la tonalidad predominante de una pieza musical. Esta indicada por uno o más sostenidos o bemoles. Su orden de aparición es: Para los sostenidos fa, do, sol, re la mi, si. para los bemoles si, mi, la, re, sol, do, fa.

armonía - Técnica que consiste en la formación de acordes.

armónicos - Componentes de un sonido que se definen como las frecuencias secundarias que acompañan a una frecuencia fundamental o generadora.

B

B - Letra que designa el Si natural en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

bajo - La voz masculina mas grave y profunda cuya tesitura va del do central hasta el mi de una octava y media más grave.

b. de Alberti - consiste en descomponer un acorde en forma de arpegio.

b. cifrado - método para indicar mediante números la armonía sobre una parte escrita del bajo.

barítono - Voz masculina cuya tesitura se encuentra en la parte media entre el tenor y el bajo.

becuadro - Signo que le devuelve a una nota su afinación natural.

bemol - Signo que baja la afinación de la nota un semitono hacia abajo.

bis - Indicación para repetir un pasaje marcado.

C

C - Letra con la que se designa la nota Do en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

cadencia - Enlace armónico que determina una tonalidad o un modo en el final de una frase, sección u obra. Los tipos de cadencia más importantes son:

perfecta - Cuando un acorde de séptima de dominante resuelve a tónica y produce sentido de reposo.

imperfecta - Cuando el acorde de dominante resuelve a otro grado que no es la tónica.

plagal - Cuando el acorde de subdominante resuelve a la tónica.

canon - Pieza o técnica musical donde una melodía que comienza mas tarde imita exactamente, al unísono o a otro intervalo a otra que ha comenzado antes.

canto - Palabra con la que se designa generalmente a la melodía principal de una obra.

clave - Signo empleado para nombrar las notas que se escriben en un pentagrama. Existen tres tipos: Sol, Fa y Do, y se colocan en diferentes posiciones

sobre el pentagrama.

coda - Parte final de un movimiento o pieza.

contrapunto - Técnica de combinar varios cantos simultáneamente sin que suenen discordantes.

coral - Composición polifónica de estilo contrapuntístico que inicialmente era escrita para un coro de voces mixto. Por lo general en un coral se utilizan 4 voces: soprano, contralto, tenor y bajo.

coro - Agrupación de cantantes que tiene mas de un componente para cada voz.

cromatismo - Empleo de notas que no son parte de una escala diatónica y que poseen alteraciones.

D

D - Letra que designa la nota Re en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

da capo - Indicación para que el interprete comience desde el principio de la pieza.

decrecendo - Indicación para que la música se interprete cada vez más suave.

desarrollo - Parte de una composición en que los motivos originales se desarrollan, expanden o modifican.

diminuendo - Se utiliza para indicar una dinámica mas suave.

dodecafonismo - Técnica compositorial en la que se utilizan las doce notas de la escala cromática sin que ninguna posea mayor jerarquía sobre las otras.

E

E - Letra que designa la nota Mi en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

escala - Serie de notas que suben o bajan su altura en forma sucesiva y que poseen una separación interválica constante.

e.cromatica - escala en la que los intervalos sucesivos que separan las notas son semitonos.

e. diatónica - Escala de 7 sonidos sin alteraciones (do, re, mi fa, sol, la, si, do).

e. mayor - Escala en la que la sucesión interválica de los sonidos es: tono, tono, semitono, tono, tono, tono, semitono.

e. menor - Escala en la que la sucesión interválica de los sonidos puede ser de 3 formas:

natural (t, s, t, t, s, t, t); armónica - en la cual el séptimo grado aumenta un semitono, y melódica, en la que el sexto y séptimo grados aumentan un semitono al ascender pero al descender regresan a su estado natural.

exposición - Parte de una composición en la que se presentan por primera vez los motivos principales.

F

F - Letra que designa la nota Fa en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

falsete - Voz aguda producida por las cuerdas vocales superiores que no corresponde a la tesitura natural del cantante.

fine - indicación de que la pieza ha concluido.

fioritura - Elemento decorativo con el que se adorna un canto.

forma - El elemento de organización de una pieza musical. /

f. binaria - Estructura musical establecida con dos secciones relacionadas (AB).

f. ternaria - Forma musical constituida por tres secciones estructuradas ABA, por lo general la segunda vez que aparece A lo hace modificada.

frase - Grupo de motivos musicales que constituyen una sección de la melodía; comparativamente se puede decir que si el motivo es el átomo de una melodía, la frase es la molécula.

frecuencia - Medida de altura de un sonido según métodos acústicos y que esta dada por el numero de vibraciones por segundo de un cuerpo.

fuga - Forma musical regida por el contrapunto imitativo normativo, obedece a principios estructurales preestablecidos. La voz que comienza la fuga se denomina sujeto la cual es imitada por otra voz en tonalidad de dominante.

fundamental - En términos acústicos es la vibración primaria o primer parcial de una serie de armónicos. Musicalmente, se entiende que la fundamental es la nota sobre la cual se construye un acorde.

fuoco - Vigoroso.

G

G - Letra que designa la nota Sol en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

Ges - En la nomenclatura alemana, sol bemol.

giocoso - Indica que el pasaje debe tocarse alegremente.

giusto - se utiliza para indicar moderación o exactitud en la melodía.

glissando - Ir de una nota a otra en diferente altura haciendo sonar rápidamente todas las demás notas que se encuentran en medio de estas.

G.P. - Gran pausa. Indica que existe un gran silencio en todos los instrumentos del ensamble.

grado - Nota de la escala diatónica que corresponde a otras notas. El primer grado corresponde a la tónica, el segundo a la supertonica, el tercero a la mediante, el cuarto a la subdominante, el quinto a la dominante, el sexto a la superdominante o submediante, y el séptimo a la sensible.

Movimiento por grado - Cuando una voz se mueve a la nota inmediata superior o inferior de la escala.

grave - indica un tiempo lento y solemne.

grupetto - Ornamento consistente en una figura de cuatro notas que se ejecutan alrededor de una sola.

H

H - En la nomenclatura alemana se emplea para designar al Si natural

homofonico - Termino que se aplica a aquella música cuyas partes se mueven simultáneamente. Se entiende también a una melodía principal con acompañamiento.

hoquetus - Uso de pausas para separar las notas de modo que cuando una voz suena, otra permanece en silencio alternándose.

I

imitación - Recurso de la técnica contrapuntística en el que una voz repite un tema o motivo previamente expuesto por otra.

intervalo - Diferencia de alturas entre dos notas. Para encontrar el intervalo entre dos sonidos se cuenta el numero de notas de la escala diatónica que los separan, la nota con la que se comienza es 1.

De acuerdo con las diferentes alteraciones que pudieran tener los intervalos, estos se dividen en:

Justos o Perfectos - Cuando son de cuarta, quinta u octava.

Mayor - Cuando son de segunda, tercera, sexta o séptima.

Menor - Cuando son de segunda, tercera sexta o séptima pero se encuentran un semitono abajo

Aumentado - Cuando además de los anteriores se han aumentado un semitono.

Disminuidos - Cuando se ha disminuido un semitono.

issorritmia - Recurso estructural en el que la voz del tenor se construye en torno a un esquema repetido de los valores de las notas.

K

Kb - Contrabajo

Keyb - Instrumento de teclado.

L

legato - Indicación en que las notas marcadas deben prolongarse ligeramente hasta que aparezca la siguiente.

ligadura - Línea curva que se traza entre dos notas de la misma altura, separadas por una barra de compás que unen sus duraciones en un solo ataque.

loco - Indica que las notas marcadas deben ser ejecutadas en el tono real escrito, en vez de una octava superior o inferior como se había indicado anteriormente.

M

marcato - Indica que las notas deben ser acentuadas.

m.d. - Indicación pianística que sugiere usar la mano derecha.

melisma - Un grupo de notas que se sitúan en una sola silaba de un canto con texto.

melodia - Sucesión de notas que tienen un diseño tonal y rítmico reconocible.

metronomo - Aparato que permite precisar el tempo de una obra.

mf - Abreviatura de mezzoforte que indica una dinámica intermedia entre fuerte y suave.

modos - Formulas de ordenación interválica de sonidos sucesivos. Los modos que han formado la base de la música accidental pueden obtenerse por medio de las notas de una escala diatónica (teclas blancas del piano) y cambiando la tónica. Estos son:

Dórico (re - re)

Frigio (mi - mi)

Lidio (fa - fa)

Mixolidio (sol - sol)

Eólico (la - la)

Jónico (do - do)

modulación - Cambio de tonalidad durante el desarrollo de una obra, de acuerdo con las reglas de la armonía.

molto - Mucho, muy.

monofónico - Que tiene o produce una sola melodía.

mordente - Ornamento consistente en el batido rápido de una nota auxiliar, superior o inferior a la nota real.

mosso - Movido, rápido.

motivo - Breve figura melódica o rítmica que constituye la célula primaria de un fragmento musical. Varios motivos pueden constituir un tema o frase.

N

natural - Nota que no tiene ninguna alteración.

nota - Símbolo que representa un sonido aislado de altura y duración determinados.

notación - Sistema de símbolos gráficos que permiten estructurar la música en un lenguaje que puede ser descifrado (leído).

O

octava - Intervalo de doce semitonos u ocho notas de la escala diatónica.

Op. - Opus. Significa Obra, y se utiliza para catalogar las obras de un compositor en particular.

orquesta - Amplio numero de instrumentistas de varias clases.

P

p - Piano, que significa suave.

pauta - pentagrama.

ped. - Indica que se deberá accionar el pedal en el piano.

pedal - Nota en el bajo que se sostiene durante varios compases.

presto - Rápido, velocidad que se encuentra entre pulsaciones por minuto.

Q

quasi - Casi, aproximadamente.

R

rallentando - Retardando.

registro - Altura en la que se encuentra la tesitura de una voz.

relativo - Denota la relación entre las tonalidades mayores y menores que tienen las mismas armaduras.

resolución - Progresión de una consonancia a una disonancia.

resonancia - Cualidad de un sistema capaz de vibrar a la misma frecuencia de otro.

retardo - Recurso consistente en crear una disonancia manteniendo una nota de un acorde en el siguiente.

rubato - Indicación que permite cierta flexibilidad en el tiempo.

S

seco - Indica que una nota debe ser soltada inmediatamente después de pulsada.

semitono - El intervalo mas pequeño de uso corriente en la música occidental.

sfz - Forzando, indica que una nota deben subrayarse intensamente.

sharp - Sostenido (#).

simile - Similar. Indica que la ejecución ha de proseguir en la forma indicada.

solmisacion - Forma de notación consistente en designar a las notas de la escala mediante silabas. Esta nomenclatura debe a Guido d'Arezzo, de allí que también se le conozca como Guidoniana.

soprano - La voz mas aguda y brillante de las tres variedades de voz femenina y de el coro en general.

sostenido - Signo que indica que la nota deberá aumentarse un semitono.

staccato - Señala que las notas marcadas deben tener una duración algo menor a lo indicado, haciendo una pausa entre ellas.

stretto - Superposición de las entradas de un tema de una fuga.

stringiendo - Señala la necesidad de intensificar la ejecución.

T

tablatura - Forma de notación para instrumentos de cuerdas pulsadas donde se señala gráficamente cual debe ser la posición de los dedos sobre el diapasón.

tasto - Indica que la ejecución deberá hacerse cerca del diapasón.

tema - Idea musical bien definida (con principio cuerpo y fin) que constituye una parte esencial de la estructura compositiva.

tempo - Velocidad con la que se debe ejecutar una obra.

tenor - La voz mas alta de las voces masculinas, su tesitura abarca desde una octava abajo hasta una octava arriba del do central.

timbre - Cualidad del sonido que lo caracteriza y lo diferencia de otro.

tonalidad - El sonido y escala predominantes de una pieza musical. Podemos entender a la tonalidad como el eje de gravedad que domina a la pieza. De esta manera, tenemos que si una obra se encuentra en la tonalidad de Mi mayor, la escala en la que se mueven las voces poseen las alteraciones de la armadura de Mi mayor. Además, si se quiere conseguir un estado de reposo dentro de la pieza, solo podrá lograrse ejecutando el acorde de Mi mayor, pues todos los demás nos dan sensación de movimiento armónico.

tónica - Nota o acorde predominantes que nos da sensación de reposo, según la tonalidad de una obra.

tono - Distancia interválica de una segunda mayor o dos semitonos.

tr - Abreviatura de trino. Consiste en alternar rápidamente la nota marcada con la que se encuentra un semitono mas arriba o abajo.

transporte - Proceso de alterar una pieza modificando su tonalidad.

tremolo - Repetición rápida de una sola nota.

tropo - Demasiado.

tutti - Indica que el pasaje debe tocarse por todos los ejecutantes.

U, V

ut - Denota la nota Do en algunos países.

vibrato - Indica que la nota debe modificar de forma rápida, breve y sutil su altura.

vif - Animado, vivo.

9. Conclusiones

Este proyecto refleja la necesidad de crear una comunicación completa entre el músico y el ingeniero, para que este último integre los conocimientos musicales básicos dentro de su formación. De forma análoga, que el músico maneja los conocimientos físicos que describen los sonidos que está ejecutando.

Este lenguaje y forma de comunicación es muy vista en el ámbito de estudios de grabación y conciertos donde el ingeniero en audio tiene una mayor comunicación con estas personas, a diferencia de un ingeniero en acústica que se desarrolla en el campo de fabricación de instrumentos musicales.

A su vez, se pudo observar y comprobar que al momento de trabajar con los músicos, se pueden desarrollar nuevos matices musicales, ya que el ingeniero fácilmente puede definir musicalmente el término, que refleja lo que él está tratando de lograr físicamente. Ejemplo de esto sería, el término musical, glissando, que en el concepto físico significaría que, de una nota a otra en diferente altura, se hacen sonar rápidamente todas las demás notas que se encuentran en medio de éstas.

Al mismo tiempo, el ingeniero ya podrá tener la facilidad de mínimamente seguir una partitura, y poder coordinar la grabación de ésta con más facilidad, con el conocimiento de donde detenerla, donde marcar sus entradas y cómo se definirá el proceso de grabación.

10. Referencias

Benson, Blair K. Audio Engineering Handbook, Mc Graw Hill, USA. 1986, 287 págs.

Helmholtz, Herman. On The Sensations of Tone, Edición Dover USA. 1954, 213 págs.

Olson, Harry F. Music, Physics and Engineering, Dover Publications, Inc New York, 1987, 247 págs.

Recuero, López Manuel. Ingeniería Acústica Editorial Paraninfo , España, 1997, 310 págs.

Beranek, Leo L., Acústica, Editorial Hispano-American, B. Aires, 1961, 492 págs.

Miyara, Federico. Sonorización y Sistemas Acústicos. Editorial Paraninfo España 2001.239 págs.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

<http://www.phys.unsw.edu.au/music/>

<http://acusticaweb.com>

11. Glosario

Acústica, definición de	1
acorde	14
Acústica Musical	2
Aerófonos	30
Armonía	22
Armónicos	6
arpa	48
Ataque	8
bemol	18
Bernouilli, Las Leyes de	57
bombo	83
bongos caja	84
calabazas	84
celesta	81
cimbalón	81
clarinete	50
clave de fa	63
clave de sol	19
claves	19
clavicémbalo	82
clavicordio	47
color	49
coma pitagoreana	14
consonante	24
contrabajo	14
contrafagot	46
Cordófonos	65
corno inglés	30
crescendo	65
cuarta	14
cuerdas musicales	15,21
Curt Sachs	34
Decaimiento	30
descrescendo	9
disonante	14
El origen de la escala musical	14
El sonido	14
Electrófonos	3
	31

embocadura de flauta	58
embocadura de lengüeta	58
entonación definida	76
entonación indefinida	76
Erich M. Von Hornbostel	30
escala cromática	24
Escala Diatónica	22
Escala Natural	20
Escala Pentatonica	21
Escala Temperada	23
etalon	16
Evolución Temporal del contenido armónico	9
Evolución Temporal del sonido	8
fagot	65
Formante	11
forte	14
frecuencia fundamental	37
frecuencia natural	37
glockenspiel	77
gong	80
Idiófonos	31
Intensidad	5
Intervalo	15
laud	48
lira marimba	77
membranas	78
membranas circulares	73
membranas rectangulares	75
Membranófonos	73
Método de Chladni	31
nodo	42
nombre de las notas musicales	37
nota, forma	17
nota, posición horizontal	20
nota, posición vertical	19
notas musicales	19
oboe	19
octava	64
Octava Natural	15,21
Onda esférica	20

Onda longitudinal	4
Onda mecánica	4
Ondas Estacionarias	9
órgano	71
pandereta	84
Pentafonia	21
pentagrama	18
Periodo de sostenido	8
pianissimo	14
piano	14
piano	50
platillos	79
primer armónico	37
quinta	15,21
Resonancia	10
saxofón	67
segundo armónico	37
semitono	22
sobretonos armónicos	72
sostenido	18
taladros	60
tam-tams	85
Teclas negras del piano	24
temperamento igual	24
Tesitura	14
timbales	82
Timbre	6
tonalidad mayor	22
tonalidad menor	22
Tónica	17
Tono	5
tono	21
Tono menor	22
tremolo	14
triangulo	80
trombón	69
trompa	70
trompeta	68
tuba	70
tubos abiertos	53
Tubos Cerrados	55

tubos de madera	62
tubos de metal	66
tumba	85
vibración de barras	72
vibración de placas	75
vibráfono	79
vibrato	14
vientre	37
vina	48
viola	46
violín	46
violonchelo	46
xilófono	78