B.A.
781.23
042

T. de Olazábal

ACUSTICA MUSICAL Y ORGANOLOGIA

RICORDI

BA 10997
ndustria Argentina
Printed in Argentina

Este libro se terminó de imprimir
en los talleres gráficos M. A. BERMEJO
11 de setiembre 539 - Haedo - Buenos Aires
el 10 de marzo de 1993

B 11
781.
18500F

TIRSO de OLAZABAL

ACUSTICA MUSICAL
Y
ORGANOLOGIA

Dibujos
de
Raquel C. de Arias

UNIVERSIDAD DE CALDAS
CENTRO DE BIBLIOTECA
Fecha I-24/01 Nro
Fondo Musico 074874
Volumen Ejemplar
Cámara y Dimensión Cuota

CASA JAYES
Libros y Accesorios Musicales

FGR23
O42

TIRSO de OLAZABAL

ACUSTICA MUSICAL Y ORGANOLOGIA

Dibujos
de
Raquel C. de Arias

UNIVERSIDAD DE CALDAS
CENTRO DE BIBLIOTECA
Fecha: I-24/01 Nro.
Facultad: Músico- 074874
Volumen: Ejemplar:
Compra: x Donación: Canje:

RICORDI

0748/4

ISBN 950-22-0188-4 Ricordi Americana S.A.E.C.

© Copyright 1954 by **RICORDI AMERICANA S.A.E.C.** Cangallo 1558 - Buenos Aires.
Todos los derechos están reservados - All rights reserved.
Queda hecho el depósito que establece la Ley 11.723.

INDICE

PÁG.

CAPITULO I 11

1. – Acústica Musical. Breve reseña histórica.
2. – El sonido: su naturaleza y condiciones de existencia.
3. – Movimiento periódico. Vibraciones.
4. – Movimiento armónico simple: su representación gráfica.
5. – Movimientos vibratorios complejos. Teorema de Fourrier.
6. – Movimiento vibratorio amortiguado.

CAPITULO II 21

7. – La sensación sonora. Sonido y ruido.
8. – Cuerpos y fuentes sonoras.
9. – El diapasón: inscripción de sus vibraciones.
10. – Indices acústicos. LA normal y LA brillante.
11. – Intervalos: su expresión como cociente de frecuencias.

CAPITULO III 27

12. – Ondas sonoras: su propagación.
13. – Velocidad del sonido.
14. – Longitud de onda. Ondas esféricas.
15. – Ondas longitudinales y transversales: su representación gráfica.
16. – Interferencia.
17. – Pulsaciones.
18. – Ondas estacionarias.

CAPITULO IV 35

19. – Reflexión del sonido.
20. – Ondas estacionarias producidas por reflexión.
21. – Refracción y difracción.
22. – Eco y reverberación.
23. – Absorción.

CAPITULO V 41

24. – Período natural de oscilación. Oscilaciones forzadas.
25. – Resonancia.
26. – Resonadores de Helmholtz y de Koenig. Cápsula manométrica.
27. – Cajas de resonancia.
28. – Respuesta lineal. Distorsión.

PÁG.

CAPITULO VI 47

29. – Sensaciones. Umbral y cima de una sensación.
30. – Leyes de Weber y de Fechner.
31. – Cualidades del sonido.
32. – Altura: su definición y dependencia.
33. – Efecto Döppler.
34. – Intensidad del sonido.
35. – Escala de la intensidad relativa: el decibel.
36. – Area auditiva. Enmascaramiento.
37. – El timbre: su definición y dependencia.

CAPITULO VII 59

38. – Escala de los armónicos.
39. – Intervalos en la escala de los armónicos.
40. – Demostración al piano de la serie armónica.
41. – Características individuales de los 16 primeros armónicos.
42. – Teoremas de Tyndall y de Helmholtz.
43. – Escala de la resonancia inferior.
44. – Origen del acorde perfecto menor.
45. – Pulsaciones producidas por los diferentes intervalos.
46. – Sonidos resultantes.
47. – Sonidos diferenciales producidos por los diferentes intervalos.

CAPITULO VIII 69

48. – Operaciones realizables con los intervalos.
49. – Construcción de escalas. Método de Aristógenes.
50. – Construcción de la escala mayor por el método de Pitágoras.
51. – Procedimiento para hallar la frecuencia de un sonido dado.
52. – La "coma". Coma sintónica y coma pitagóriga.
53. – Comparación entre ambos tipos de escala diatónica.
54. – Inconvenientes presentados por las escalas de Pitágoras y de Aristógenes.
55. – El temperamento. El temperamento desigual.
56. – El temperamento igual. Procedimiento de Chladni.
57. – Nociones sobre afinación de los instrumentos de teclado.
58. – Escalas formadas por intervalos menores que el semitono templado.
59. – Medición de intervalos según los sistemas de Herschel, Ellis y Yasser.

CAPITULO IX 83

60. – Clasificación usual de los instrumentos.
61. – Clasificación de los instrumentos según Gevaert.
62. – Clasificación de los instrumentos según Hornbostel y Sachs.

PÁG.

63. – Constitución de las cuerdas musicales.
64. – Vibraciones de las cuerdas musicales. Nodos y vientres.
65. – El sonómetro.
66. – Leyes relativas a la vibración de las cuerdas.
67. – Parciales y armónicos producidos por una cuerda.
68. – Ley de Young.
69. – Distribución de la energía sonora entre los diversos armónicos según el modo de excitación de una cuerda.
70. – Vibraciones longitudinales de las cuerdas.

CAPITULO X 91

71. – Instrumentos de cuerda frotada.
72. – El violín.
73. – La viola, el violoncelo y el contrabajo.
74. – El arco. Su acción sobre las cuerdas.
75. – Las violas. Viola de amor y viola "da gamba".
76. – Instrumentos de cuerda punteada.
77. – El arpa.
78. – El clave.
79. – La guitarra, la mandolina y el laúd.
80. – Instrumentos de cuerda percutida.
81. – El piano.

CAPITULO XI 109

82. – Tubos sonoros: su clasificación.
83. – Vibraciones de la columna de aire contenida en un tubo.
84. – Sonidos que puede producir un tubo abierto.
85. – Sonidos que puede producir un tubo cerrado.
86. – Leyes que rigen las vibraciones de los tubos.
87. – Correcciones de longitud en los tubos sonoros.
88. – Longitud de los tubos correspondientes a los diversos "DO" empleados en música.
89. – Lengüetas y boquillas: diversos tipos.
90. – Tubos de embocadura.
91. – Tubos de lengüeta.
92. – Tubos de boquilla.

CAPITULO XII 121

93. – Instrumentos de viento.
94. – Obtención de la escala sobre los diferentes instrumentos.
95. – La flauta.
96. – El oboe.
97. – El clarinete.
98. – Los saxófonos.
99. – El fagot. Los sarrusófonos.
100. – La trompa.
101. – La trompeta.
102. – El trombón.

UNIVERSIDAD DE CALDAS

PÁG.

103. – Saxhornos y saxotrombas. La tuba.
104. – El órgano.
105. – El armonio.
106. – La voz humana: vocales y consonantes.
107. – El vibrato vocal e instrumental.

CAPITULO XIII 143

108. – Varillas vibrantes. Vibraciones longitudinales de las varillas.
109. – Vibraciones transversales de las varillas. El diapasón.
110. – Membranas y placas vibrantes. Figuras acústicas de Chladni.
111. – Instrumentos de percusión.
112. – Instrumentos de percusión de entonación definida. Los timbales.
113. – Las campanas.
114. – El xilófono y la celesta.
115. – Instrumentos de percusión de entonación indefinida.

CAPITULO XIV 151

116. – Instrumentos musicales mecánico-eléctricos.
117. – Instrumentos musicales radioeléctricos.
118. – Las Ondas Martenot.
119. – El órgano eléctrico.
120. – Instrumentos musicales que reproducen mecánicamente el sonido.
121. – Grabación y reproducción mecánica del sonido.
122. – El disco gramofónico de grabación eléctrica.
123. – El alambre sonoro.
124. – La película sonora.
125. – El fotoliptófono.

APENDICES 159

I. – Acústica de las salas.
II. – Anatomía y fisiología del oído.
III. – Hallar el número de veces que la coma sintónica está contenida en el tono grande y en el tono pequeño.
IV. – Determinación de la velocidad del sonido.
V. – Instrumentos transpositores.

PROLOGO

Una de las características más notables del arte musical en los últimos decenios es sin duda alguna, el prodigioso aumento de su campo de acción, antes limitado a una reducida minoría y extendido ahora a grandes sectores de la población mediante el disco y la radiotelefonía que permiten al aficionado conocer sin esfuerzo y en poco tiempo, mayor cantidad de música que el profesional de antaño en varios años de experiencia. Paralelamente, las vinculaciones entre nuestro arte y las diversas ramas de la ciencia y la técnica modernas con él relacionadas, se han estrechado de tal modo que es inadmisible que el músico deseoso de poseer una preparación completa ignore las leyes fundamentales de la Acústica, los procedimientos de formación de las escalas y los principios que informan la construcción de los instrumentos musicales o los métodos principales para registrar y reproducir el sonido.

La índole de este trabajo, destinado al estudiante de música, cuya cultura científica suele ser descuidada en favor de la preparación técnica necesaria a su carrera, me ha decidido a incluir en el texto, directamente o mediante apéndices y notas al pie, las nociones de Matemáticas, de Psicología y de Anatomía y Fisiología del Oído indispensables a la comprensión de ciertos párrafos. Asimismo, por considerarlo de interés he agregado apéndices sobre los instrumentos transpositores, acústica de las salas y determinación de la velocidad del sonido.

El sistema de índices acústicos utilizado en la presente obra es aquel que atribuye al Do central el subíndice 4, por ser éste el más sencillo y racional. Los cálculos de frecuencia han sido basados sobre el LA de 440 ciclos adoptado por el "Congreso Técnico Internacional de Acústica" reunido en Londres en 1953.

No quisiera terminar estas líneas sin dejar constancia de mi agradecimiento a cuantos han contribuído de una u otra manera a la realización de este libro, y muy particularmente a la Sra. Raquel C. de Arias por sus excelentes ilustraciones y por la dedicación y empeño puestos en la corrección del manuscrito y de las pruebas, al Profesor José Torre Bertucci, cuya inigualada experiencia en la enseñanza de la materia ha sido para mí de gran valor en la presentación de algunos temas, al Arquitecto José de Larrocha por algunas de las ilustraciones del Capítulo XIV, y al Sr. Enrique Gerardi por la redacción del Apéndice III.

TIRSO DE OLAZÁBAL.
Profesor de Acústica Musical en el Conservatorio de Música y Arte Escénico de la Provincia de Buenos Aires, "Eva Perón", Ciudad Eva Perón.

Buenos Aires, agosto de 1954.

CAPITULO I

Acústica Musical. Breve reseña histórica. — El sonido: su naturaleza y condiciones de existencia. — Movimiento periódico. Vibraciones. — Movimiento armónico simple: su representación gráfica. — Movimientos vibratorios complejos. Teorema de Fourrier. — Movimiento vibratorio amortiguado.

1. ACUSTICA MUSICAL. BREVE RESEÑA HISTORICA. — Desígnase actualmente con el nombre de Acústica Musical a un conjunto bastante heterogéneo de conocimientos científicos sobre la física del sonido y diversos aspectos técnicos del arte musical.

Data de muchos siglos la preocupación del hombre por conocer las leyes que rigen el sonido. En los albores de la filosofía griega, encontramos a Pitágoras (582-500 a. C.) realizando junto con sus discípulos (Euclides, Erastótenes y Ptolomeo entre otros), las primeras experiencias científicas sobre el sonido de que haya noticia; estos filósofos encontraban en las relaciones entre las longitudes de las cuerdas y los intervalos armónicos más sencillos, la base para muchas especulaciones. Las teorías pitagóricas, ampliadas con el aporte de Aristógenes y Aristóteles, pasaron a los romanos, quienes no introdujeron ninguna modificación de interés.

En el siglo VI, Severino Boecio codificó en su tratado "De Institutione Musica", toda la teoría musical de su época; su autoridad e influencia fué casi tan grande en el medioevo como la de Aristóteles, y sobre los escritos de ambos se apoyan todos los teóricos hasta fines del siglo XIV.

Con el desarrollo de la música instrumental surgen, en los siglos XV y XVI, teóricos como Salinas y Ramos de Pareja, quienes se aplicaron a resolver los problemas relacionados con el temperamento de los instrumentos de teclado [1], pudiendo decirse que en esta época comienza verdaderamente el estudio científico de la Acústica Musical: Gassendi (1592-1655) descubrió la relación entre la altura de un sonido y la frecuencia del movimiento vibratorio que lo origina; Mersenne (1588-1648) estableció las leyes que aún llevan su nombre so-

[1] Véanse los párrafos 55 y 56.

bre vibraciones de las cuerdas y realizó estudios sobre el eco; Otto von Guericke descubrió que el sonido no se propaga en el vacío. Posteriormente, Euler y d'Alembert formularon la teoría matemática de las cuerdas vibrantes y Bernoulli estableció la de los tubos sonoros.

Durante el siglo XIX, Helmholtz, Lord Rayleigh y Koenig realizaron los estudios que han fundamentado la Acústica Musical moderna y los experimentos de Young y Edison sobre inscripción de movimientos vibratorios y la invención del gramófono por este último, abrieron al arte y a la ciencia perspectivas extensísimas.

Entre los investigadores más recientes destacaremos a Dayton C. Miller, inventor del "phonodeik" [2], con el cual ha realizado profundos estudios sobre el timbre de los instrumentos musicales y a W. Sabine, cuyos trabajos han contribuído en gran parte a resolver los numerosos problemas de acústica presentados por las salas de concierto.

2. EL SONIDO: SU NATURALEZA Y CONDICIONES DE EXISTENCIA. — El sonido es la materia prima de todo estudio de Acústica; por lo tanto, analizaremos en primer lugar sus condiciones de existencia y posteriormente las leyes que lo rigen.

Para obtener sonido es necesario ante todo un cuerpo que realice un movimiento de cierto tipo llamado movimiento vibratorio. Este movimiento puede ser obtenido por procedimientos sumamente diversos, como veremos al estudiar los instrumentos musicales, y en algunos casos es difícil de poner en evidencia, pero existe siempre; basta como demostración de esto, el hecho fácilmente observable de la cesación del sonido producido por un diapasón cuando se impide el movimiento de sus ramas.

El movimiento vibratorio es condición necesaria pero no suficiente para que exista sonido, pues aún deben concurrir simultáneamente otros dos factores: un medio trasmisor, habitualmente el aire, en el cual se propagarán las ondas producidas por el movimiento vibratorio, y un sujeto receptor que capte las ondas producidas en el medio trasmisor y las transforme en sensación sonora mediante un aparato adecuado, el oído. Cumpliéndose estas tres condiciones habrá sonido; las ondas producidas en el medio trasmisor serán llamadas ondas sonoras y el cuerpo que realiza el movimiento vibratorio, cuerpo sonoro.

La necesidad de medio trasmisor se demuestra fácilmente colocando un reloj despertador o una campanilla eléctrica en acción bajo la campana de una bomba neumática: al progresar la extracción del aire que ésta contiene, el sonido se debilita, y llegando el vacío a un punto suficientemente elevado, cesa por completo.

El sujeto receptor posee fundamental importancia, pues en su ausencia sólo habrá movimiento vibratorio y las ondas que éste produzca, pero no sonido, mientras no se haya efectuado la transformación necesaria. El oído selecciona de entre las ondas aquellas que son

[2] Véase el párrafo 37.

transformables. En efecto, si en un grupo de personas, una es insensible a las ondas producidas por un movimiento vibratorio determinado, no habrá sonido para ella y se dirá que es sorda para ese sonido, aunque en rigor debiera decirse que es sorda para dicho movimiento vibratorio. Esto demuestra claramente el carácter subjetivo del sonido, o más bien, de la sensación sonora.

Podemos ahora definir el *sonido* diciendo que es *la sensación experimentada cuando llegan al oído las ondas producidas por determinados movimientos vibratorios.*

3. MOVIMIENTO PERIODICO. VIBRACIONES. — Cuando un móvil pasa por los mismos puntos a intervalos iguales de tiempo, con idénticos sentidos y velocidades, se dice que realiza un *movimiento periódico.* El tiempo transcurrido entre dos pasajes consecutivos del móvil por la misma posición (con el mismo sentido y velocidad) se llama *periodo* "T" del movimiento periódico.

Se llama *fase* de un movimiento periódico, el tiempo transcurrido desde el instante t_0 en que el móvil pasa por una posición dada hasta el instante considerado t. El punto donde se halla el móvil en el instante t_0 se llama *origen de los tiempos,* pues determina el instante desde el cual se cuenta. La revolución de los planetas alrededor del sol es un caso típico de este movimiento; en efecto, pasan periódicamente por cada punto de su trayectoria con una velocidad que depende de su distancia al sol.

En ciertos movimientos periódicos el móvil se desplaza sobre una trayectoria rectilínea o curvilínea recorriéndola alternativamente en un sentido y en sentido contrario. Este tipo de movimiento periódico se llama *movimiento oscilatorio.*

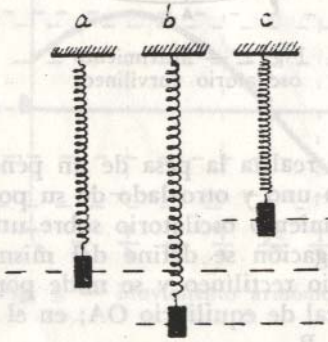


Fig. 1. — Movimiento oscilatorio rectilíneo.

Estudiemos ahora un movimiento oscilatorio rectilíneo: consideremos un punto "O" de una pesa colgada de un resorte y llevemos ésta verticalmente hacia abajo desde su posición de reposo (fig. 1a.), de

modo que el punto O ocupe la posición Q′ (fig. 1b). Si soltamos ahora la pesa, la elasticidad del resorte hará que ésta oscile en línea recta a uno y otro lado de la posición de reposo; el punto O pasará de Q′ a Q″ cuando el resorte alcance su máxima contracción (fig. 1c).

Se llama *elongación* a la distancia en un instante dado entre el móvil y su posición de equilibrio.

Se llama *amplitud* "A" del movimiento oscilatorio a la máxima elongación: $A = OQ' = OQ''$.

El recorrido cumplido por el punto "O" desde Q′ hasta Q″ o desde Q″ hasta Q′ constituye una oscilación simple, y su duración es de medio período. El movimiento realizado por el punto O de la pesa al cumplir consecutivamente los recorridos Q″Q′ y Q′Q″ constituye una *oscilación doble,* habitualmente denominada *ciclo* o hertz; su duración es de un período.

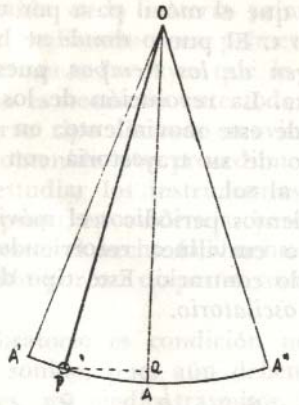


Fig. 2. — Movimiento oscilatorio curvilíneo.

El movimiento que realiza la pesa de un péndulo al recorrer un arco de circunferencia a uno y otro lado de su posición de equilibrio es un ejemplo de movimiento oscilatorio sobre una trayectoria curvilínea (fig. 2). La elongación se define del mismo modo que para el movimiento oscilatorio rectilíneo y se mide por la distancia desde la pesa P hasta la vertical de equilibrio OA; en el caso de la figura 2, PQ es la elongación de P.

El recorrido cumplido por la pesa P desde A′ hasta A″ o viceversa, constituye una oscilación simple y su duración es de medio período. El movimiento cumplido por P al efectuar ambos recorridos consecutivamente (A′A″ + A″A′) constituye una oscilación doble y su duración es de un período; en el caso de la fig. 3, la pesa P cumplirá una oscilación doble cuando recorra los arcos PA′, A′A″, A″P. El período de oscilación de un péndulo depende solamente de su longitud.

Cuando el período de un movimiento oscilatorio es pequeño, dicho movimiento es llamado movimiento vibratorio y sus oscilaciones son llamadas vibraciones. Éste es, como vimos ya, el movimiento de todos los cuerpos y fuentes sonoras.

Se define como *frecuencia* "n" de un movimiento vibratorio —o de cualquier movimiento periódico— al número de veces que es contenido el período "T" en la unidad de tiempo adoptada. Por lo tanto, "n" es la inversa de "T" y puede escribirse: $n = 1/T$ y $T = 1/n$. La unidad de tiempo adoptada para medir los movimientos vibratorios es el segundo.

4. MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE: SU REPRESENTACION GRAFICA. — El más sencillo de los movimientos vibratorios, llamado *movimiento armónico simple,* es aquel que se obtiene cuando los desplazamientos del cuerpo vibrante son directamente proporcionales a las fuerzas que provocan dichos desplazamientos.

Cuando un punto recorre una circunferencia con velocidad uniforme, su proyección [1] sobre cualquiera de los diámetros de dicha circunferencia realiza un movimiento armónico simple. Consideremos la figura 3a: el punto P recorre la circunferencia de radio OP y centro O en sentido contrario al de las agujas del reloj. Tracemos en cada instante una perpendicular desde P a uno de los diámetros de la circun-

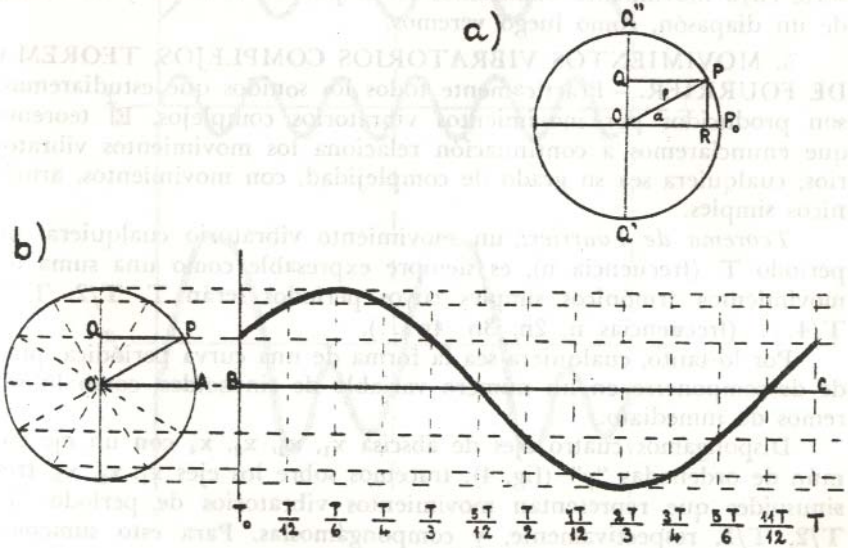


Fig. 3. — Movimiento armónico simple.

[1] Se llama proyección de un punto sobre una recta al pie de la perpendicular trazada desde el punto a la recta.

modo que el punto O ocupe la posición Q′ (fig. 1b). Si soltamos ahora la pesa, la elasticidad del resorte hará que ésta oscile en línea recta a uno y otro lado de la posición de reposo; el punto O pasará de Q′ a Q″ cuando el resorte alcance su máxima contracción (fig. 1c).

Se llama *elongación* a la distancia en un instante dado entre el móvil y su posición de equilibrio.

Se llama *amplitud* "A" del movimiento oscilatorio a la máxima elongación: $A = OQ' = OQ''$.

El recorrido cumplido por el punto "O" desde Q′ hasta Q″ o desde Q″ hasta Q′ constituye una oscilación simple, y su duración es de medio período. El movimiento realizado por el punto O de la pesa al cumplir consecutivamente los recorridos Q″Q′ y Q′Q″ constituye una *oscilación doble,* habitualmente denominada *ciclo* o hertz; su duración es de un período.

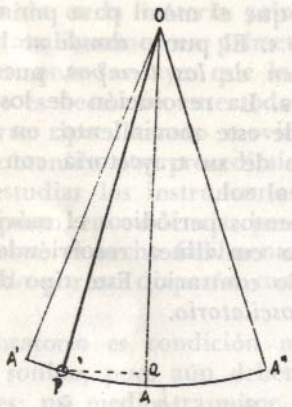


Fig. 2. — Movimiento oscilatorio curvilíneo.

El movimiento que realiza la pesa de un péndulo al recorrer un arco de circunferencia a uno y otro lado de su posición de equilibrio es un ejemplo de movimiento oscilatorio sobre una trayectoria curvilínea (fig. 2). La elongación se define del mismo modo que para el movimiento oscilatorio rectilíneo y se mide por la distancia desde la pesa P hasta la vertical de equilibrio OA; en el caso de la figura 2, PQ es la elongación de P.

El recorrido cumplido por la pesa P desde A′ hasta A″ o viceversa, constituye una oscilación simple y su duración es de medio período. El movimiento cumplido por P al efectuar ambos recorridos consecutivamente (A′A″ + A″A′) constituye una oscilación doble y su duración es de un período; en el caso de la fig. 3, la pesa P cumplirá una oscilación doble cuando recorra los arcos PA′, A′A″, A″P. El período de oscilación de un péndulo depende solamente de su longitud.

Cuando el período de un movimiento oscilatorio es pequeño, dicho movimiento es llamado movimiento vibratorio y sus oscilaciones son llamadas vibraciones. Éste es, como vimos ya, el movimiento de todos los cuerpos y fuentes sonoras.

Se define como *frecuencia* "n" de un movimiento vibratorio —o de cualquier movimiento periódico— al número de veces que es contenido el período "T" en la unidad de tiempo adoptada. Por lo tanto, "n" es la inversa de "T" y puede escribirse: $n = 1/T$ y $T = 1/n$. La unidad de tiempo adoptada para medir los movimientos vibratorios es el segundo.

4. MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE: SU REPRESENTACION GRAFICA. — El más sencillo de los movimientos vibratorios, llamado *movimiento armónico simple,* es aquel que se obtiene cuando los desplazamientos del cuerpo vibrante son directamente proporcionales a las fuerzas que provocan dichos desplazamientos.

Cuando un punto recorre una circunferencia con velocidad uniforme, su proyección [1] sobre cualquiera de los diámetros de dicha circunferencia realiza un movimiento armónico simple. Consideremos la figura 3a: el punto P recorre la circunferencia de radio OP y centro O en sentido contrario al de las agujas del reloj. Tracemos en cada instante una perpendicular desde P a uno de los diámetros de la circun-

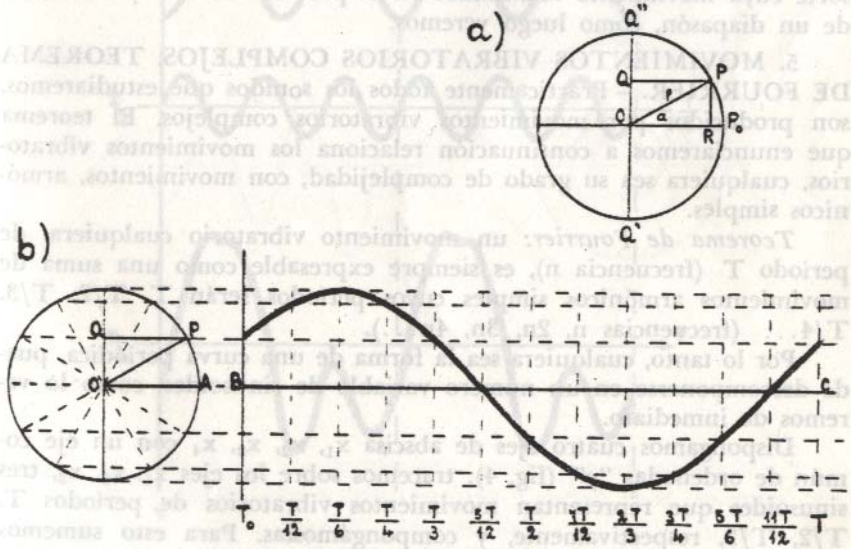


Fig. 3. — Movimiento armónico simple.

[1] Se llama proyección de un punto sobre una recta al pie de la perpendicular trazada desde el punto a la recta.

ferencia (hemos elegido el diámetro Q''Q') y obtendremos un punto Q que será la proyección de P sobre dicho diámetro. Cuando el punto P se mueva con velocidad uniforme, el punto Q realizará un movimiento oscilatorio rectilíneo que será armónico simple.

El período T y por lo tanto la frecuencia n del movimiento armónico simple de Q serán iguales al período y a la frecuencia del movimiento circular uniforme de P. La amplitud A del movimiento de Q es igual al radio OP de la circunferencia recorrida por P.

Para representar gráficamente el movimiento armónico simple de un punto, se toman como abscisas los tiempos (medidos como fracciones de período: T/12, T/6, T/4...) y como ordenadas las sucesivas elongaciones del mismo. La curva obtenida en esta representación será una sinusoide (fig. 3b), pues la variación de t se traduce en variación del seno del ángulo α. La elongación OQ del punto Q que realiza el movimiento armónico simple puede determinarse en cualquier instante conociendo el tiempo "t", la amplitud "A" y la frecuencia "n" de dicho movimiento.

Las oscilaciones de un péndulo obedecen a las leyes del movimiento armónico simple cuando su amplitud es pequeña; asimismo, el resorte cuyo movimiento analizamos en el párrafo anterior y las ramas de un diapasón, como luego veremos.

5. MOVIMIENTOS VIBRATORIOS COMPLEJOS. TEOREMA DE FOURRIER. — Prácticamente todos los sonidos que estudiaremos, son producidos por movimientos vibratorios complejos. El teorema que enunciaremos a continuación relaciona los movimientos vibratorios, cualquiera sea su grado de complejidad, con movimientos, armónicos simples.

Teorema de Fourrier: un movimiento vibratorio cualquiera, de período T (frecuencia n), es siempre expresable como una suma de movimientos armónicos simples cuyos períodos serán T, T/2, T/3, T/4... (frecuencias n, 2n, 3n, 4n...).

Por lo tanto, cualquiera sea la forma de una curva periódica, puede descomponerse en un número variable de sinusoides, como lo veremos de inmediato.

Dispongamos cuatro ejes de abscisa x_1, x_2, x_3, x_4 con un eje común de ordenadas "y" (fig. 4); tracemos sobre los ejes x_1, x_2, x_3, tres sinusoides que representan movimientos vibratorios de períodos T, T/2, T/3, respectivamente, y compongámoslas. Para esto sumemos algebraicamente las ordenadas de las tres curvas para cada punto de abscisas y dispongamos la curva resultante sobre el eje de abscisas x_4. Es fácil ver que la curva resultante es periódica y que su período es T, pero que no es una sinusoide, por lo cual no corresponde a un movimiento armónico simple (movimiento vibratorio simple), sino a un movimiento vibratorio complejo.

Realicemos mediante un péndulo una composición de movimientos armónicos. Recordemos que el período de oscilación de un péndulo depende sólo de su longitud, siendo proporcional a la raíz cuadrada de la misma y que sus oscilaciones se cumplen siempre dentro de un mismo plano. Tomemos un péndulo que oscila con un período T dentro de un plano dado y comuniquémosle un impulso cuya dirección sea perpendicular a la del plano de oscilación. Este impulso producirá en el péndulo un nuevo movimiento oscilatorio que, como el primero, será armónico simple, y al componerse con él dará origen

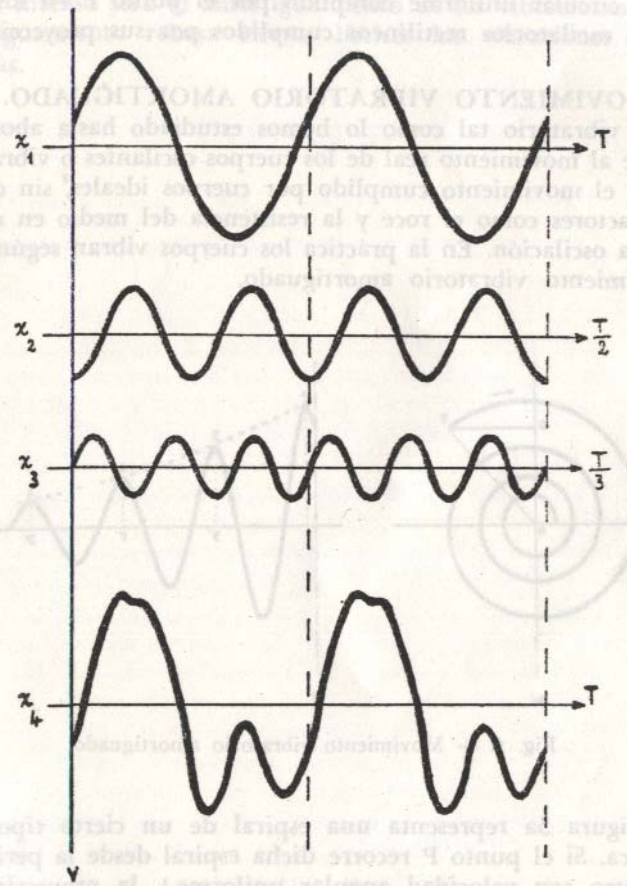


Fig. 4. — Composición de movimientos armónicos simples.

a un movimiento periódico complejo. El período T del nuevo movimiento será igual al del movimiento oscilatorio primitivo, puesto que la longitud del péndulo no ha variado. Si los dos impulsos poseen la misma intensidad, el recorrido de la pesa del péndulo será circular y diremos que ejecuta un movimiento pendular cónico. Si en cambio, difiere en intensidad del primero, o sea que la amplitud de los movi-

mientos componentes es distinta, la trayectoria de la pesa del péndulo será una elipse cuyo eje mayor estará dispuesto en la dirección del impulso más fuerte, o sea del movimiento oscilatorio de mayor amplitud.

Esta experiencia demuestra cómo puede obtenerse un movimiento circular componiendo dos movimientos rectilíneos. Puede observarse en la figura 3a, la operación inversa, o sea la descomposición del movimiento circular uniforme cumplido por el punto P en los dos movimientos oscilatorios rectilíneos cumplidos por sus proyecciones "Q" y "R".

6. MOVIMIENTO VIBRATORIO AMORTIGUADO. – El movimiento vibratorio tal como lo hemos estudiado hasta ahora no corresponde al movimiento real de los cuerpos oscilantes o vibrantes sino que sería el movimiento cumplido por cuerpos ideales, sin que intervengan factores como el roce y la resistencia del medio en el cual se cumple la oscilación. En la práctica los cuerpos vibran según las leyes del movimiento vibratorio amortiguado.

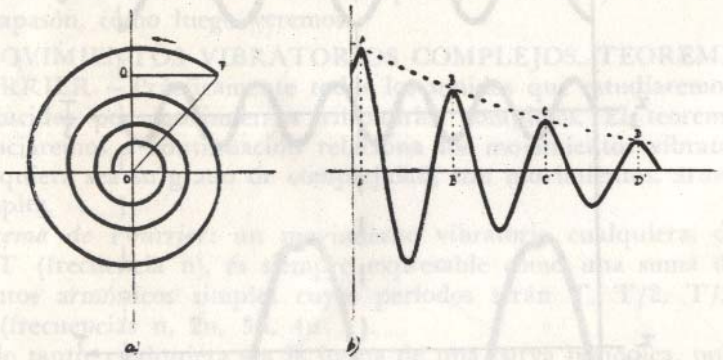


Fig. 5. — Movimiento vibratorio amortiguado.

La figura 5a representa una espiral de un cierto tipo llamada logarítmica. Si el punto P recorre dicha espiral desde la periferia hasta el centro con velocidad angular uniforme [1], la proyección Q del punto P sobre el eje de ordenadas trazado por O realizará un movimiento oscilatorio amortiguado. La fig. 5b representa gráficamente el movimientos de Q. Se obtiene como la figura 3b, disponiendo sobre las abscisas los tiempos y sobre las ordenadas las elongaciones de Q.

La amplitud en el movimiento vibratorio amortiguado es la máxima elongación de la primera vibración (en la fig. 5b: amplitud = = AA′). La elongación máxima disminuye para cada vibración sucesiva de un modo tal que la primera elongación máxima es a la segunda, como la segunda es a la tercera, y así sucesivamente. Este modo de decrecimiento se llama decrecimiento logarítmico. Obsérvese que las distancias A′B′, B′C′ y C′D′ (fig. 5b) son iguales, o sea que el tiempo entre las vibraciones sucesivas es el mismo (un período).

La curva ABCD que une las crestas sucesivas indica el decrecimiento logarítmico y cuanto más rápidamente se acerque al eje de abscisas, más intenso será el amortiguamiento de las vibraciones. Cuando el amortiguamiento rebasa ciertos límites las vibraciones se hacen aperiódicas.

[1] La velocidad angular del punto P será igual al ángulo barrido por el radio vector OP en la unidad de tiempo.

CAPITULO II

La sensación sonora. Sonido y ruido. — Cuerpos y fuentes sonoras. — El diapasón: inscripción de sus vibraciones. — Indices acústicos. LA normal y LA brillante. — Intervalos: su expresión como cociente de frecuencias.

7. LA SENSACION SONORA. SONIDO Y RUIDO. — Las cualidades que se distinguen habitualmente en el sonido o más bien en las sensaciones sonoras son tres: altura, intensidad y timbre. Existen otras cualidades del sonido como la duración, el brillo y el volumen, que estudiaremos más adelante (párrafo 31).

La *altura* de un sonido es la cualidad que queremos expresar cuando decimos que un sonido es más agudo o más grave que otro; depende principalmente de la frecuencia del movimiento vibratorio que lo origina, correspondiendo los sonidos agudos a las frecuencias elevadas y los graves a las frecuencias bajas [1].

Como dijimos antes, el oído selecciona las vibraciones aptas para ser transformadas en sonido. Por lo que a la frecuencia se refiere, producen sonido los movimientos vibratorios que se hallan entre 16 y 20.000 ciclos [2]. Estos límites son bastante imprecisos, variando de persona a persona, sobre todo el superior. Los sonidos cuya frecuencia sobrepasa los 12.000 ciclos ocurren raramente en la práctica musical. Los movimientos vibratorios cuya frecuencia es insuficiente para producir sonido se llaman infrasonidos, llamándose ultrasonidos aquellos que sobrepasan el límite de las frecuencias audibles.

La *intensidad* de un sonido es la cualidad que queremos expresar cuando decimos que un sonido es más fuerte o más débil que otro; depende en primera aproximación de la amplitud del movimiento vibratorio que la origina.

El *timbre* es la cualidad que permite diferenciar dos sonidos de igual altura e intensidad, pero de diversa procedencia; depende del

---

[1] La frecuencia de los sonidos se determina en la actualidad mediante tonómetros; antiguamente esta determinación se realizaba mediante sirenas, siendo la más conocida la de Cagniard de Latour.

[2] En algunos textos anticuados, estos límites se hallan indicados en vibraciones simples (desde 32 hasta 40.000).

grado de complejidad del movimiento vibratorio que origina el sonido. Un cuerpo que vibra según las leyes del movimiento armónico simple produce un sonido puro, como veremos al estudiar el diapasón; la mayoría de los sonidos provienen de movimientos vibratorios complejos.

Sabemos por el teorema de Fourrier que si un cuerpo realiza un movimiento vibratorio complejo, podemos considerar que realiza simultáneamente los movimientos armónicos simples en que este movimiento puede descomponerse; por lo tanto, si el movimiento vibratorio complejo produce un sonido, éste es descomponible en los sonidos puros que provienen de los movimientos armónicos simples componentes. Cada sonido puro se llamará *armónico* o alicuoto, llamándose *fundamental* o primer armónico [3] el sonido más grave correspondiente al movimiento armónico simple de período T (frecuencia n), y segundo armónico, tercer armónico, etc., los siguientes, cuyos períodos serán T/2, T/3, etc. El conjunto de las sensaciones sonoras producidas por los armónicos producirá la sensación de timbre del sonido que componen.

Como veremos al tratar de los instrumentos musicales, un mismo cuerpo sonoro puede producir varios sonidos según las condiciones en que vibre; el más grave de estos sonidos se llama también fundamental, pero los demás deben ser llamados *parciales* en lugar de armónicos, pues la serie de sonidos parciales obtenible sobre un cuerpo sonoro puede ser semejante o no a la serie armónica derivada de la misma fundamental. En el primer caso los parciales serán parciales concordantes y se los puede designar como armónicos sin gran error; en el segundo caso serán parciales discordantes y será incorrecto designarlos como armónicos. Conviene reservar esta palabra a los sonidos que provienen de la descomposición de un sonido complejo; desgraciadamente, muchos autores utilizan ambos términos con idéntico significado, causando confusión.

El número de armónicos que forman el timbre de cada sonido depende del cuerpo sonoro que lo produce y de la manera de excitar a éste; por esta razón el timbre de un sonido permite precisar su procedencia y modo de obtención.

Hemos empleado hasta ahora la palabra sonido para todas las sensaciones sonoras, pero puede clasificárselas en dos grandes grupos mal definidos: sonido y ruido. El *sonido* (tomando esta palabra en su sentido restringido) es una sensación agradable producida por movimientos vibratorios periódicos, de altura definida y de proveniencia fácil de establecer. El *ruido*, en cambio, es una sensación frecuentemente desagradable, producida por movimientos aperiódicos (irregulares), de altura imprecisa y proveniencia incierta.

La mayoría de los instrumentos musicales producen sonidos y ruidos simultáneamente; desde luego, la intensidad de estos últimos

[3] Es incorrecto separar la fundamental de los demás armónicos, llamando primer armónico al que es en realidad el segundo.

es muy pequeña comparada con la de los primeros, pero contribuyen a caracterizarlos.

8. CUERPOS Y FUENTES SONORAS. — Se llaman cuerpos sonoros aquellos que mediante una excitación adecuada vibran de manera tal que producen sonidos. Cuando las moléculas que forman un cuerpo sonoro son desalojadas de su posición de equilibrio, se originan debido a las fuerzas elásticas, movimientos compensatorios que tienden a devolverles su posición inicial, produciéndose así las vibraciones.

Los cuerpos sonoros utilizados en música pertenecen por su estado físico a los sólidos y a los gases. Los cuerpos sólidos pueden tener muy variados orígenes: madera, metal, tripa, material plástico, etc. Por su forma se los divide en varillas, placas, cuerdas y membranas; las varillas y cuerdas son cuerpos en que la longitud es mucho mayor que las otras dos dimensiones, mientras que en las placas y membranas el largo y el ancho son notablemente mayores que el espesor. Cabe hacer notar que los cuerpos rígidos como las varillas y las placas necesitan sólo de un punto de sostén para actuar como cuerpos sonoros, mientras que las cuerdas y membranas, como cuerpos flexibles, deben ser previamente puestas en tensión.

El aire es un cuerpo sonoro de enorme importancia, interviniendo de diversas maneras en casi todos los fenómenos sonoros.

La electricidad, aunque de uso relativamente reciente, ha llegado a ser una de las fuentes sonoras más utilizadas.

9. EL DIAPASON: INSCRIPCION DE SUS VIBRACIONES. — El diapasón es una varilla metálica utilizada en música como patrón de frecuencia, por ser ésta practicamente invariable una vez fijadas sus dimensiones y poseer un sonido puro y nítido. Se lo construye generalmente doblado en U, pero también en forma de varilla recta.

Tomemos ahora un diapasón en forma de U por ser ésta la más apropiada para nuestro experimento, y pongámoslo en vibración golpeándolo con un pequeño martillo; puede observarse que la intensidad del sonido producido no es constante, sino que decrece hasta que deja de oírse. Esto se debe a que el diapasón vibra según las leyes del movimiento vibratorio amortiguado.

Fijemos una púa sobre una de las ramas del diapasón y mientras éste vibra, deslicémoslo en línea recta a velocidad constante, de manera que la púa se mantenga en contacto con un vidrio ahumado; observaremos que inscribe una curva sobre la superficie ennegrecida, que será la representación gráfica directa del movimiento vibratorio del diapasón. La curva obtenida será prácticamente una sinusoide, pues el sonido que emite el diapasón está desprovisto de armónicos, proviniendo de un único movimiento vibratorio.

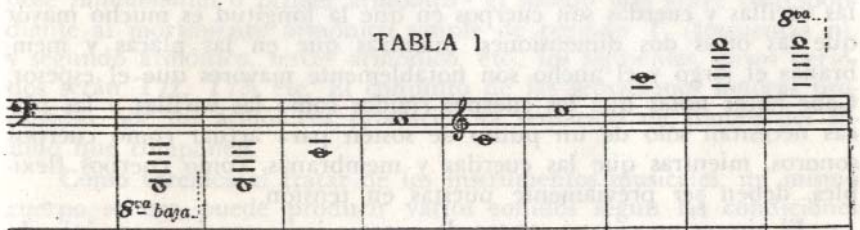
No conviene inscribir las vibraciones inmediatamente después de percutir el diapasón, pues generalmente su sonido es menos puro en

los primeros instantes debido a que la percusión produce vibraciones irregulares que mueren rápidamente.

10. INDICES ACUSTICOS. "LA" NORMAL Y "LA" BRILLANTE. — Para fijar la altura de los diversos sonidos empleados en música sin recurrir a la notación musical corriente, han sido ideados diversos sistemas de índices acústicos que consisten en ordenar todos los sonidos en sentido ascendente y atribuir a cada DO un subíndice propio u otra señal convencional que se conserva para todas las notas de la octava que le sigue.

Véanse en la tabla I, los sistemas de subíndices utilizados con mayor frecuencia. En esta obra emplearemos exclusivamente el primero por ser el más sencillo y racional.

TABLA I



I	Do_0	Do_1	Do_2	Do_3	Do_4	Do_5	Do_6	Do_7	Do_8
II	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
III	Do_{-2}	Do_{-1}	Do_1	Do_2	Do_3	Do_4	Do_5	Do_6	Do_7
IV	C_{-2}	C_{-1}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
V	C_2	C_1	C	c	c'	c''	c'''	c''''	c'''''
VI	CCCC	CCC	CC	C	c'	c''	c'''	c''''	c'''''

Es costumbre afinar las orquestas y los instrumentos en general tomando como base la afinación del LA_4. Ésta ha variado considerablemente, desde 373 ciclos (observado por Mersenne en 1648) hasta 461 ciclos durante el siglo pasado en Norteamérica. En el siglo XVII, el desorden en lo referente a la afinación del LA_4 era tal, que se afinaba a distinta altura, según se ejecutara música sagrada (Chorton) o profana (Kammerton). La tendencia general de la afinación ha sido ascendente, buscando el brillo que trae consigo el ascenso, pero desde fines del siglo pasado este ascenso ha sido contenido y estabilizado, pues la altura excesiva perjudica el timbre de todos los instrumentos, volviéndolo estridente.

En Viena se reunió en 1885 un congreso que fijó la frecuencia del LA_4 en 435 ciclos, llamándose este LA, *LA normal* o internacional. Actualmente se utiliza el LA_4 de 440 ciclos, llamado *LA brillante* o de concierto, con el cual afinan casi todas las orquestas de importancia; establecido por una convención internacional reunida en Londres en 1939, fué definitivamente adoptada en 1953 por el "Congreso Técnico Internacional de Acústica".

Las frecuencias de los diversos DO fueron fijadas por los físicos, para mayor simplicidad, como potencias sucesivas de 2: $DO_0 = 16$; $DO_1 = 32$; $DO_2 = 64$ ciclos; y así sucesivamente 128, 256, 512 ciclos, etc. A esta afinación, llamada aritmética o filosófica, corresponde un LA_4 de 427 ciclos. No ha sido utilizada nunca en la práctica musical, pero es necesario conocerla, pues se la encuentra frecuentemente en diversas obras científicas.

11. INTERVALOS: SU EXPRESION COMO COCIENTE DE FRECUENCIAS. — Los intervalos musicales, ya sean melódicos o armónicos, se expresan habitualmente en Acústica Musical por el cociente de las frecuencias de los sonidos que los componen; dicho cociente puede dejarse indicado, simplificarse o efectuarse, según convenga. Existen además otros medios para expresar intervalos que se estudiarán en el párrafo 59.

Para expresar los intervalos como cociente de frecuencias, se ha convenido en colocar como denominador la frecuencia del sonido a partir del cual se cuenta el intervalo. Según este sistema, la quinta justa ascendente LA_4-MI_5 será 660/440; la cuarta justa descendente LA_4-MI_4 será 330/440.

La gran ventaja que presenta este método estriba en que cada especie de intervalos se caracteriza por una relación que le es propia: si simplificamos la fracción que corresponde a la quinta justa LA_4-MI_5: 660/440, obtendremos la relación 3/2 que no sólo corresponde a esta quinta justa, sino a todas las quintas justas, cualquiera sea la altura de los sonidos que las compongan. Por lo tanto las fracciones 660/440; 150/100; 900/600; 300/200; etc., que simplificadas dan 3/2 corresponderán siempre a sonidos que forman un intervalo de quinta justa.

De igual modo a la octava justa le corresponderá la relación 2/1 y a la cuarta justa la relación 4/3. En los capítulos VII y VIII podrán verse las relaciones que caracterizan a los demás intervalos y las distintas operaciones que con ellas pueden efectuarse.

CAPITULO III

Ondas sonoras: su propagación. — Velocidad del sonido. — Longitud de onda. Ondas esféricas. — Ondas longitudinales y transversales: su representación gráfica. — Interferencia. — Pulsaciones. — Ondas estacionarias.

12. ONDAS SONORAS: SU PROPAGACION. — Como vimos anteriormente (párrafo 2), una de las condiciones para la existencia del sonido es la presencia de un medio elástico que trasmita las vibraciones del cuerpo sonoro al sujeto receptor. Dichas vibraciones se propagarán en el medio elástico formando ondas que por su naturaleza se llamarán *ondas sonoras*. El aire actúa como medio trasmisor en la inmensa mayoría de los casos, aunque existen numerosos cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos capaces de reemplazarlo.

Para comprender la formación de la ondas sonoras iniciaremos nuestro estudio analizando el caso de la propagación en un medio elástico de una perturbación única. La figura 6 representa un medio elástico en cinco instantes sucesivos: el eje de ordenadas "y" corresponde a los tiempos y para cada instante se ha dibujado un eje de abscisas con el objeto de facilitar la comprensión del esquema. En la fig. 6a se ha representado el medio elástico en un instante anterior a aquel en que se produce la perturbación (los tiempos se cuentan desde dicho instante, razón por la cual el eje de ordenadas presenta una discontinuidad).

Supongamos que en el instante t_0 (fig. 6b) se produzca por cualquier razón una perturbación P en el punto de abscisa x_0 que saca a las partículas de su posición de equilibrio; si posteriormente, en el instante t_1 (fig. 6c) encontramos dicha perturbación P en el punto de x_1 tal que $x_1 = v.t_1$; en el instante t_2 (fig. 6d) la encontramos en el punto de abscisa x_2 tal que $x_2 = v.t_2$; en el instante t_3 (fig. 6e) en el punto de abscisa x_3 tal que $x_3 = v.t_3$ y así sucesivamente, diremos que la perturbación P se ha propagado con velocidad uniforme "v" en la dirección del eje "x". Podremos escribir en términos generales $x = v.t$. Como veremos en el párrafo 13, "v" es constante para cada medio elástico.

Si en lugar de producirse en x_0 una única perturbación P se realiza un movimiento periódico de período T, se producirán en el punto x_0 perturbaciones sucesivas "Q", "R", "S" (figuras 6c, 6d, 6e), que se propagarán del mismo modo que la perturbación "P". Como las

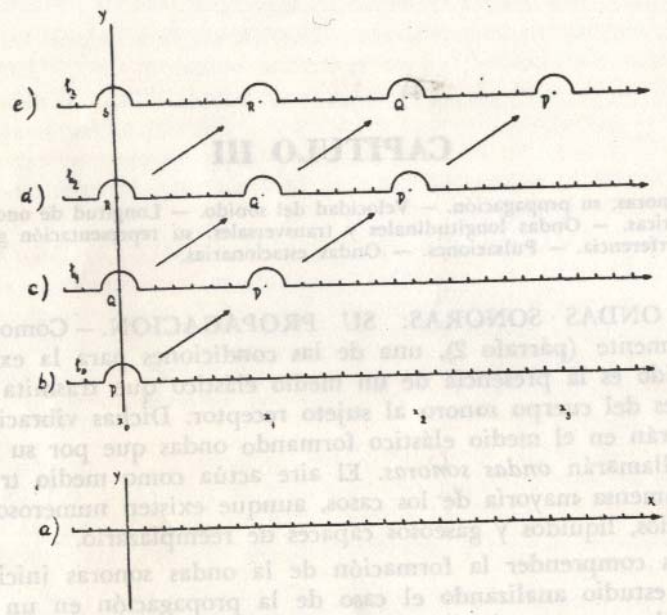


Fig. 6. — Propagación de una onda en un medio elástico.

perturbaciones son originadas por un movimiento periódico de período T, el tiempo entre cada perturbación equivaldrá a T, o sea que $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = T$. Podemos decir entonces que el movimiento periódico de período T ha originado una onda con el mismo período que se propaga en el medio elástico con velocidad "v" y en la dirección del eje "x".

13. VELOCIDAD DEL SONIDO. — La velocidad del sonido depende sólo de la elasticidad y de la densidad del medio en que se propagan las ondas sonoras y no de las características de éstas (frecuencia, amplitud, complejidad). Al aumentar la elasticidad del medio trasmisor, aumenta la velocidad de las ondas que en él se propagan, disminuyendo por el contrario si aumenta la densidad. Por esta razón la temperatura afecta marcadamente la velocidad del sonido, que aumenta al elevarse ésta, pues simultáneamente disminuye la densidad y aumenta la elasticidad.

En el aire a 0°C (grados centígrados), la velocidad media del sonido es de 333 m/s, y a 15°C es de 340 m/s [1].

A continuación pueden verse las velocidades del sonido en diversos medios trasmisores (a 15°C salvo indicación contraria).

TABLA II

Caucho	35 m/s.	Plata	2 600 m/s.
Cloro gaseoso	207 „	Cobre	3 800 „
Aire a 0°C	333 „	Hierro	4 950 „
Aire a 15°C [1]	340 „	Aceros comunes	5 000 „
Alcohol etílico	1 260 „	Vidrio	5 600 „
Agua a 8°C	1 435 „	Aceros especiales	13 500 „

[1] La velocidad del sonido en el aire aumenta 0,6 m/s por cada grado centígrado de aumento en la temperatura.

En algunas explosiones han sido observadas velocidades del sonido mayores que las habituales; se supone que se produce un fenómeno de arrastre entre las ondas explosivas y las ondas sonoras.

14. LONGITUD DE ONDA. ONDAS ESFERICAS. — Se llama longitud de onda "λ" (landa) de una onda determinada, a la distancia que ésta recorre en el tiempo de un período; si en la fórmula $x = v.t$ que dimos en el párrafo anterior, substituímos "t" por "T", "x" se convierte en "λ" y podemos escribir: $\lambda = v.T$.

En la ecuación $\lambda = v.T$ podemos substituir el período "T" por la frecuencia "n", con lo que obtendremos una nueva ecuación que relaciona la longitud de onda λ con la frecuencia: $\lambda = v/n$. Como la velocidad de propagación "v" es constante para cada medio, diremos que la longitud de onda varía en relación inversa con la frecuencia. Si una onda de frecuencia "n" cambia de medio de propagación, propagándose con velocidad diferente, cambiará su longitud de onda, pues la frecuencia es invariable.

Si entre dos puntos situados en la dirección de propagación de una perturbación hay una distancia λ, éstos estarán simultáneamente en el mismo estado de perturbación o sea que sus elongaciones tendrán el mismo valor y signo, y diremos que dichos puntos están en concordancia de fase.

Cuando una onda se propaga libremente en todas direcciones, constituye una onda esférica; éste es el modo de propagación de las ondas sonoras en el aire libre. La energía sonora se reparte igualmente

[1] Véase en el apéndice IV, un método para determinar esta velocidad.

en cada dirección y decrece proporcionalmente al cuadrado de la distancia recorrida por la onda. Si tiramos una piedra en un estanque podemos observar en su superficie círculos concéntricos de radio creciente que constituyen un corte de la onda esférica que la piedra produce en el agua.

Representando gráficamente la onda producida por un movimiento vibratorio cualquiera, obtendremos una curva idéntica a la que se obtiene representando el movimiento mismo, siempre que el medio en que se propaga sea perfectamente elástico; el aire puede considerarse como tal y por lo tanto, la onda sonora producida por un movimiento armónico simple se representará con la misma sinusoide que éste y las ondas sonoras producidas por movimientos vibratorios complejos se representarán como ellos, por provenir de la composición de idénticas sinusoides.

15. ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES: SU REPRESENTACION GRAFICA. — Los diversos tipos de ondas se clasifican según el movimiento realizado por las partículas perturbadas; si éste se efectúa en la misma dirección que la de propagación de la onda, diremos que son *ondas longitudinales;* si el movimiento de las partículas ocurre en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, diremos que éstas son *ondas transversales.*

La figura 7 es la representación gráfica de una onda transversal. Los puntos sobre el segmento AB representan las moléculas en reposo. La curva CD representa las moléculas anteriormente consideradas, en un instante de propagación de la onda. La ordenada de cada punto es proporcional a la elongación del mismo o sea al desplazamiento sufrido.

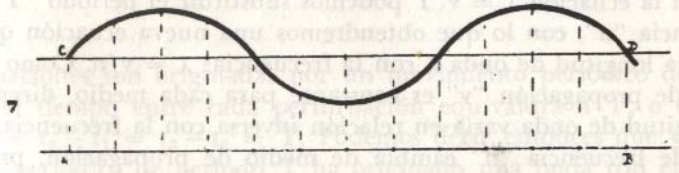


Fig. 7. — Onda transversal.

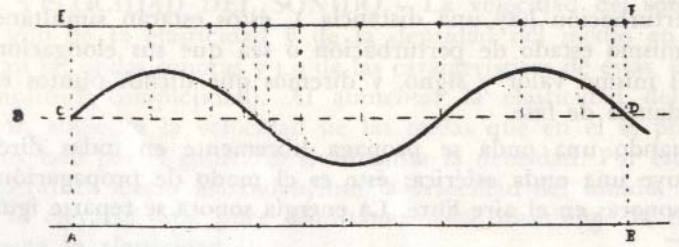


Fig. 8. — Onda longitudinal.

La figura 8 es la representación gráfica de una onda longitudinal. Los puntos sobre el segmento AB representan, como en la figura anterior, las moléculas en reposo. La curva CD representa convencionalmente un instante de propagación de la onda. Las ordenadas de los puntos serán como antes proporcionales a las elongaciones de los mismos y para obtener la representación exacta de la onda longitudinal, será necesario rebatir sobre el segmento CD las distintas elongaciones (en el sentido de la propagación si son positivas y en el sentido contrario si son negativas). Para mayor claridad conviene proyectar los puntos así obtenidos sobre un tercer segmento EF paralelo al anterior.

Las ondas longitudinales en un medio gaseoso se traducen por sucesivas condensaciones y rarefacciones (compresiones y dilataciones).

16. INTERFERENCIA. — Cuando dos o más ondas se propagan simultáneamente en un medio elástico, las partículas de dicho medio realizan movimientos que provienen de la composición de los movimientos que esas ondas imprimirían por separado a cada partícula; este fenómeno es llamado *interferencia.*

Si las ondas están en concordancia de fase y tienen el mismo período y dirección, pero distinta amplitud, la onda resultante tendrá el mismo período que sus componentes pero su amplitud será la suma de las amplitudes de cada componente. La composición gráfica se realiza de igual modo que para los movimientos vibratorios.

Se llama *diferencia de fase* entre dos movimientos ondulatorios o periódicos de igual período, el tiempo que transcurre desde el instante en que las elongaciones de uno de ellos alcanzan el valor cero, tomando luego valores positivos, hasta el momento en que las elongaciones del otro alcanzan el mismo valor con idéntica condición. Si este tiempo equivale a T/4 por ejemplo, se dice que el primer movimiento tiene un adelanto de fase de T/4 sobre el segundo, o que éste atrasa un cuarto de período (T/4) respecto del primero. Si la diferencia de fase llega a T/2 (medio período), se dice que los movimientos están en oposición de fase.

Cuando dos movimientos ondulatorios están en oposición de fase, y su dirección, amplitud y frecuencia son iguales, las partículas del medio elástico solicitadas en cada instante por fuerzas que se anulan recíprocamente no sufrirán perturbación alguna y se producirá interferencia total; en el caso de dos ondas sonoras, se anularán ambos sonidos produciéndose silencio.

Los fenómenos de interferencia total con ondas sonoras, se obtienen solamente en condiciones de laboratorio, pues en la práctica siempre se obtienen ondas esféricas que no llegan a interferir totalmente.

Si se excita un diapasón y luego se lo hace girar lentamente cerca del oído, podrá observarse que en cuatro posiciones el sonido se intensifica y en otras cuatro se debilita. Este fenómeno es producido por la interferencia entre ambas ramas del diapasón, pues en un instante da-

do, el aire entre ellas se halla comprimido y el aire exterior se halla dilatado; esta situación se invierte medio período más tarde, dilatándose el aire comprimido entre las ramas y comprimiéndose el aire exterior. Es evidente que los fenómenos que se producen entre las ramas difieren en medio período con los fenómenos exteriores a ellas; por esta razón se produce interferencia en las zonas de contacto entre ambas ondas [1] que no es total porque entre ondas esféricas ésta es imposible.

17. PULSACIONES. — Cuando en un medio elástico se propagan simultáneamente dos ondas de diferente frecuencia, la amplitud del movimiento ondulatorio resultante pasará periódicamente por máximos y mínimos. Esto será perceptible en las ondas sonoras (cuando la frecuencia de ambas ondas no difiera mayormente), por aumentos y disminuciones periódicas de la intensidad llamados *pulsaciones* [2]. El número de pulsaciones que se producirá entre dos sonidos será igual a la diferencia entre las frecuencias de ambos. Un sonido de 440 ciclos y otro de 445 ciclos producirán cinco pulsaciones por segundo. Cuando el número de pulsaciones que se producen entre dos sonidos alcanza ciertos valores que dependen de las frecuencias de los sonidos pulsantes, las pulsaciones no se perciben separadamente sino que modifican el timbre del conjunto produciendo una sensación de aspereza.

Pueden obtenerse pulsaciones con facilidad, tomando dos diapasones de igual frecuencia y modificando la de uno de ellos mediante una bolita de cera o lacre que se colocará sobre una de sus ramas. Los diapasones que antes vibraban al unísono, produciendo un sonido de intensidad uniforme, presentarán ahora pulsaciones muy marcadas. También pueden obtenerse pulsaciones tomando dos tubos de órgano iguales y variando ligeramente las dimensiones de uno de ellos. Este método tiene la ventaja de que la intensidad de las pulsaciones se mantiene constante no faltando aire en los tubos, mientras que el amortiguamiento de los diapasones hace que disminuya enseguida la intensidad de las pulsaciones que se originan entre ellos.

Las pulsaciones tienen un papel importantísimo en muchos fenómenos musicales: contribuyen a las sensaciones de consonancia o disonancia, permiten afinar los instrumentos, etc.

18. ONDAS ESTACIONARIAS. — Cuando en un medio elástico se propagan dos ondas de igual frecuencia y amplitud en la misma dirección pero en sentido contrario, se producen ciertas ondas llamadas *ondas estacionarias* porque las perturbaciones que las constituyen permanecen inmóviles, difiriendo en ésto con los demás tipos de ondas que son progresivas.

Veamos la figura 9, donde hemos representado el proceso de formación de una onda estacionaria a partir de dos ondas "m" y "n" de pe-

[1] Puede demostrarse que las líneas de demarcación entre las zonas de compresión y dilatación o sea las líneas sobre las cuales la intensidad es mínima, corresponden a las ramas de una hipérbola.

[2] Es frecuente llamar a las pulsaciones por su nombre en italiano "battimentos".

ríodo "T" y amplitud "a" que se propagan en una misma dirección con sentido contrario. Partamos del instante T_0 en que las ondas se

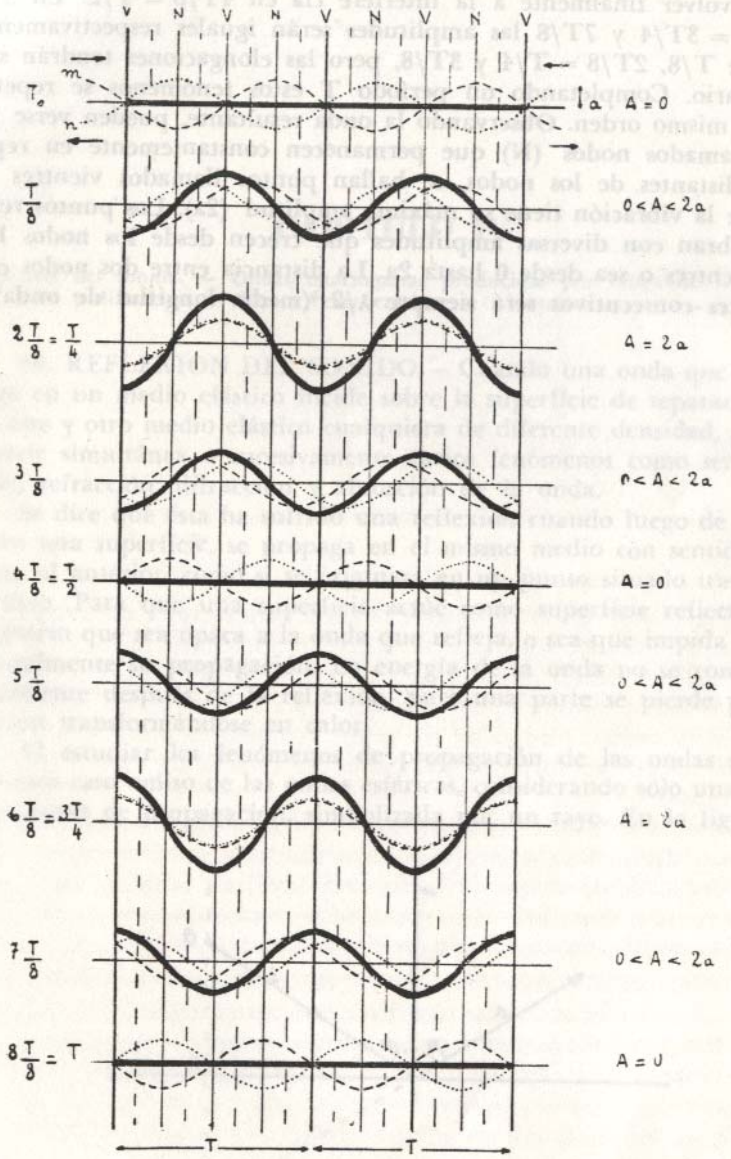


Fig. 9. — Ondas estacionarias.

hallan en oposición de fase: la onda resultante es nula y la amplitud es cero, puesto que hay interferencia total. En el instante T/8 la am-

plitud "A" de la onda estacionaria tendrá un valor comprendido entre 0 y 2a, valor este último que será alcanzado en el instante $2T/8=T/4$; luego la onda pasará en el instante $3T/8$ por un estado semejante a $T/8$ para volver finalmente a la interfere cia en $4T/8 = T/2$. En $5T/8$, $6T/8 = 3T/4$ y $7T/8$ las amplitudes serán iguales respectivamente a las de $T/8$, $2T/8 = T/4$ y $3T/8$, pero las elongaciones tendrán signo contrario. Completando un período T estos fenómenos se repetirán en el mismo orden. Observando la onda resultante, pueden verse puntos llamados nodos (N) que permanecen constantemente en reposo. Equidistantes de los nodos, se hallan puntos llamados vientres (V), donde la vibración tiene su máxima amplitud (2a). Los puntos restantes vibran con diversas amplitudes que crecen desde los nodos hacia los vientres o sea desde 0 hasta 2a. La distancia entre dos nodos o dos vientres consecutivos será siempre $\lambda/2$ (media longitud de onda).

CAPITULO IV

Reflexión del sonido. — Ondas estacionarias producidas por reflexión. — Refracción y difracción. — Eco y reverberación. — Absorción.

19. REFLEXION DEL SONIDO. — Cuando una onda que se propaga en un medio elástico incide sobre la superficie de separación entre éste y otro medio elástico cualquiera de diferente densidad, pueden ocurrir simultánea o sucesivamente varios fenómenos como ser: reflexión, refracción, difracción y absorción de la onda.

Se dice que ésta ha sufrido una reflexión cuando luego de incidir sobre una superficie, se propaga en el mismo medio con sentido diferente al anterior, como si se originara en un punto situado tras la superficie. Para que una superficie actúe como superficie reflectora, es necesario que sea opaca a la onda que refleja, o sea que impida parcial o totalmente su propagación. La energía de la onda no se conservará totalmente después de la reflexión, pues una parte se pierde por absorción transformándose en calor.

Al estudiar los fenómenos de propagación de las ondas sonoras haremos caso omiso de las ondas esféricas, considerando sólo una de las direcciones de propagación, simbolizada por un rayo. En la figura 10,

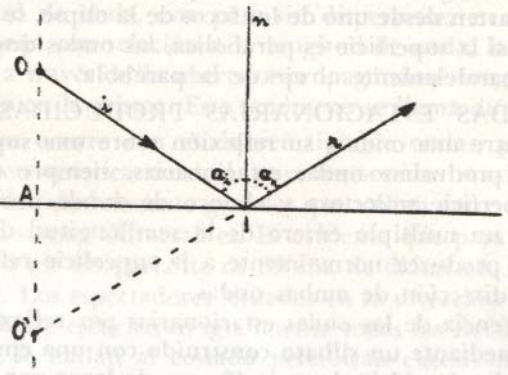


Fig. 10. — Reflexión de un rayo.

"i" es el rayo incidente, "r" el rayo reflejo, "I" el punto de incidencia y "n" la normal a la superficie reflectora en "I". En toda reflexión la normal y los rayos incidente y reflejo estarán en un mismo plano y los ángulos de incidencia y de reflexión ("α_i" y "α_r") serán iguales.

Cuando la longitud de onda de la onda incidente es despreciable comparada con las irregularidades de la superficie reflectora, la reflexión será regular. La reflexión será difusa cuando la longitud de onda de la onda incidente y las irregularidades de la superficie reflectora sean comparables (fig. 11).

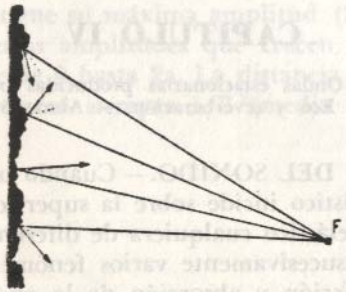


Fig. 11. — Reflexión difusa.

La densidad del medio reflector influye sobre la reflexión; si es mayor que la del medio primitivo, la onda refleja sufre un retraso de fase de medio período con respecto a la onda incidente, mientras que si la densidad del medio reflector es menor que la del medio primitivo, la onda refleja continúa exactamente la onda incidente, sin retraso de fase ni otro cambio que el de dirección (cuando la onda incide normalmente sobre la superficie reflectora, no cambia de dirección pero sí de sentido).

Las ondas que inciden sobre una superficie plana se reflejan en direcciones divergentes. Cuando la superficie reflectora es elíptica, las ondas que parten desde uno de los focos de la elipse, se reflejan pasando por el otro; si la superficie es parabólica, las ondas que parten del foco se reflejan paralelamente al eje de la parábola.

20. ONDAS ESTACIONARIAS PRODUCIDAS POR REFLEXION. — Entre una onda y su reflexión sobre una superficie cualquiera, pueden producirse ondas estacionarias, siempre que la distancia entre la superficie reflectora y el foco de donde provienen las ondas directas sea un múltiplo entero de la semilongitud de onda y que la reflexión se produzca normalmente a la superficie reflectora para que coincida la dirección de ambas ondas.

La existencia de las ondas estacionarias por reflexión se demuestra fácilmente mediante un silbato construído con una embocadura de madera y un tubo de vidrio de unos 40 cms. de largo por 3 cms. de diámetro. Si en el interior del tubo se colocan pequeños granos de licopodio,

éste mostrará mientras suena el silbato, zonas de gran agitación y otras de tranquilidad que corresponden respectivamente a los vientres y a los nodos. Al cesar el sonido, podrá observarse que el licopodio se ha dispuesto en pequeños montículos equidistantes que corresponden a los nodos, pues las partículas tienden a acumularse donde no hay movimiento. La distancia entre la cima de dos montículos consecutivos será exactamente $\lambda/2$ (media longitud de onda).

21. REFRACCION Y DIFRACCION. — Cuando una onda que se propaga en un medio elástico incide oblicuamente sobre la superficie de separación de éste con un segundo medio y la atraviesa cambiando de dirección, decimos que ha sufrido una *refracción*. Este fenómeno ocurre precisamente porque la onda incide oblicuamente sobre la superficie (los rayos normales a dicha superficie no se refractan); en efecto, una parte de la onda penetra antes que la otra en el segundo medio, cambiando su velocidad de propagación; si la velocidad de propagación es mayor en el segundo medio que en el primero, la onda se alejará de la normal en el punto de incidencia, ocurriendo lo contrario cuando dicha velocidad sea menor.

El rayo incidente, la normal a la superficie refringente en el punto de incidencia y el rayo refractado estarán en un mismo plano, denominándose ángulo de refracción el ángulo formado por el rayo refractado con la normal.

Sobre una planicie nevada pueden oírse sonidos producidos a gran distancia debido a que el aire sobre ella forma capas de diferentes temperaturas, estando las más frías próximas al suelo; como en éstas la velocidad del sonido es menor, es constantemente refractado hacia la tierra. En las salas de espectáculo ocupadas, ocurre lo contrario: el sonido tiende a subir debido a la refracción producida por el aire en torno a los espectadores, cuya temperatura es mayor que la del aire situado a mayor altura.

Cuando una onda incide sobre una superficie en la cual hay una abertura, pueden ocurrir dos cosas: si la abertura es grande con relación a la longitud de onda, ésta pasa sin dispersarse; en cambio si la abertura es pequeña con relación a la longitud de onda, la onda se dispersará al pasar a través de la abertura propagándose luego como si se hubiera originado en la misma. Este fenómeno se llama *difracción*.

La difracción ocurre con cualquier tipo de ondas, pero interesa particularmente en acústica musical, pues los sonidos musicales poseen longitudes de onda relativamente grandes que varían entre 0,03 y 12 m., siendo por lo tanto muy difractables. Es evidente que para sonidos graves producidos en un altoparlante de 30 cm. de diámetro, la difracción será considerable. Los espectadores situados en la dirección del eje principal del altoparlante escucharán igualmente todas las frecuencias mientras que los que se hallan al costado percibirán excesivamente los sonidos graves.

22. ECO Y REVERBERACION. – Llámase *eco* el fenómeno que consiste en escuchar un sonido reflejado después de haberse extinguido la sensación sonora producida por la onda directa que originó dicha onda refleja. El oído distingue como sensaciones separadas sólo aquellas que ocurren con un intervalo de tiempo mayor de un décimo de segundo. En este tiempo el sonido recorrerá aproximadamente 34 m.; será por lo tanto necesario, cuando haya una sola superficie reflectora, que ésta se halle a una distancia mínima de 17 m. y que la onda incidente sea normal a la superficie reflectora, pues de otro modo la onda refleja no volvería a la fuente.

Cuando un sonido único tiene varios ecos sucesivos, se dice que hay eco múltiple. Proviene de la presencia de varias superficies reflectoras a distancias diferentes.

Se dice que hay eco plurisílabo, cuando el eco reproduce varios sonidos sucesivos o palabras de dos o más sílabas. En un segundo pueden pronunciarse tres sílabas, con lo cual corresponderá a cada una un tercio de segundo aproximadamente. Durante este tiempo podrá el sonido recorrer 112 m., por lo cual en el caso de una reflexión normal a la superficie reflectora, ésta debe hallarse a 56 m. como mínimo. Dividiendo la distancia entre la fuente sonora y la superficie reflectora por 56, obtendremos el número de sílabas que podrá reproducir dicho eco.

Cuando una onda sonora refleja llega al oído del observador en un lapso de tiempo menor que un décimo de segundo después que ha cesado de escucharse la onda directa de la cual proviene, ambos sonidos se superponen para el oyente, produciéndose el fenómeno de la *reverberación* (llamado a veces, aunque impropiamente, resonancia). Este fenómeno es de suma importancia pues debidamente controlado contribuye a mejorar las condiciones acústicas de teatros, salas de concierto, etc.

23. ABSORCION. – Se llama *absorción* del sonido el fenómeno por el cual una onda sonora incidente sobre una superficie reflectora pierde parte de su energía, transformándose ésta en trabajo y en calor.

El poder absorbente de los diversos cuerpos depende principalmente de su estructura; los cuerpos porosos: celotex, cortinados, fieltros y cuerpos similares, tienen un alto poder absorbente, ocurriendo lo contrario con los cuerpos compactos: mármol, metales, mosaicos, etc. La determinación de dicho poder se efectúa por comparación entre la absorción presentada por una superficie dada del material cuyo poder absorbente se mide y una abertura de igual superficie, que naturalmente absorbe todo el sonido que sobre ella incide. Se obtienen los así llamados *coeficientes de absorción* de cada material. La unidad de poder absorbente es el "sabin", llamada así en honor de W. C. Sabine quien realizó profundos estudios sobre acústica de las salas [1].

[1] Véase apéndice I.

Los sonidos agudos son absorbidos mucho más que los graves. Este hecho es de gran importancia en las salas de concierto donde a veces experimenta el sonido múltiples reflexiones, persistiendo desproporcionadamente los sonidos graves. Después de cuatro reflexiones sobre una superficie recubierta con lona, un DO_2 quedará reducido al 66 % de su energía inicial, mientras que un DO_7 queda reducido solamente al 18 % de su energía inicial.

CAPITULO V

Período natural de oscilación. Oscilaciones forzadas. — Resonancia. — Resonadores de Helmholtz y de Koenig. Cápsula manométrica. — Cajas de resonancia. — Respuesta lineal. Distorsión.

24. PERIODO NATURAL DE OSCILACION. OSCILACIONES FORZADAS. — Todo cuerpo capaz de realizar movimientos oscilatorios tiende a adoptar el movimiento oscilatorio para el cual requiere menor energía, o sea aquel en que se logran desplazamientos máximos aplicando un mínimo de fuerza. El período de dicho movimiento oscilatorio se llama *período natural de oscilación* [1] y es determinado en primer lugar por la elasticidad y la masa [2] del cuerpo, siendo proporcional a ambos. Existe además en todo cuerpo, una cierta resistencia al movimiento oscilatorio llamada "impedancia", que provoca el amortiguamiento de las oscilaciones.

Se dice que un cuerpo realiza oscilaciones forzadas cuando oscila con un período que difiere de su período natural de oscilación, bajo el influjo de una fuerza periódica exterior de intensidad suficiente, la que le comunica su propio período de oscilación. La amplitud de las oscilaciones forzadas es proporcional a la de la fuerza excitante, siendo su frecuencia igual a la de dicha fuerza. Entre las oscilaciones forzadas y la fuerza excitante existe siempre cierto atraso de fase. Las oscilaciones forzadas cesan al cesar la fuerza excitante.

El funcionamiento del oído se basa sobre las oscilaciones forzadas que imprimen sobre el tímpano las ondas sonoras; igualmente se basan sobre este fenómeno los micrófonos, teléfonos y la mayoría de los instrumentos musicales.

25. RESONANCIA. — Cuando un cuerpo o sistema de cuerpos es excitado por una fuerza periódica de frecuencia natural, igual o semejante a la suya, se produce en él un fenómeno llamado *resonancia*, por el cual vibra con la frecuencia de la fuerza excitante. Las vibraciones

---

[1] Podría hablarse igualmente de "frecuencia natural de oscilación".

[2] Llámase "masa" de un cuerpo al cociente entre su peso y la aceleración de la gravedad en el lugar donde se lo pesa.

causadas por resonancia se llaman también vibraciones por simpatía. La resonancia es un fenómeno general que existe igualmente en el campo eléctrico y en el campo mecánico.

Si intentamos separar las ramas de un diapasón, veremos que es necesaria una fuerza considerable; colocando sin embargo a cierta distancia otro diapasón de la misma frecuencia, veremos que al vibrar éste, vibrará por resonancia el primero. Lo que para nosotros significa un esfuerzo, lo consiguen fácilmente por resonancia los pequeños impulsos provenientes de las ondas sonoras emitidas por el segundo diapasón, de igual frecuencia que el primero.

Es evidente que la resonancia es muy similar como fenómeno a las oscilaciones forzadas. Obsérvese, sin embargo, que la intensidad de la fuerza excitante debe ser mucho mayor en este último caso.

Existen dos tipos de resonancia: resonancia aguda y resonancia amplia. Se dice que un cuerpo presenta *resonancia aguda* cuando responde muy marcadamente a fuerzas excitantes cuya frecuencia es igual o casi igual a su frecuencia natural, respondiendo débilmente a las fuerzas excitantes cuya frecuencia sea algo diferente a la suya. Se dice que un cuerpo presenta *resonancia amplia* cuando responde a fuerzas excitantes de frecuencia bastante diferente a su frecuencia natural, aunque dicha respuesta sea relativamente débil. En ambos tipos de resonancia, la respuesta presentada alcanzará un máximo cuando coincidan las frecuencias de la fuerza excitante y del cuerpo resonante.

Para explicarnos la diferencia de comportamiento entre los cuerpos que presentan resonancia aguda y los que presentan resonancia amplia, es necesario tomar en cuenta la velocidad con que se amortiguan sus vibraciones o sea, su amortiguamiento. Consideremos primero el caso en que el cuerpo resonante y la fuerza excitante tengan la misma frecuencia: si el amortiguamiento del cuerpo resonante es pequeño cada impulso de la fuerza excitante persistirá lo suficiente para sumarse al siguiente, alcanzando la resonancia valores grandes con toda rapidez (resonancia aguda); si el amortiguamiento del cuerpo resonante es grande, cada impulso de la fuerza excitante se anulará con rapidez y el impulso siguiente encontrará al cuerpo resonante casi en reposo, razón por la cual los valores que se alcanzarán serán relativamente pequeños (resonancia amplia). Cuando la frecuencia de las fuerzas excitantes difiere con la frecuencia natural del cuerpo resonante, la situación anterior se invierte; en efecto, en los cuerpos cuyo amortiguamiento es pequeño, los sucesivos impulsos cuyo período ya no coincide con el del cuerpo resonante, interfieren entre sí, anulándose mutuamente mientras que en aquellos cuyo amortiguamiento es grande, el amortiguamiento mismo anula los sucesivos impulsos de manera que no interfieran entre sí. Por esta razón en los casos de resonancia aguda, la respuesta decae notablemente en cuanto se aleja la frecuencia de la fuerza excitante de la frecuencia natural del cuerpo resonante, en tanto que los cuerpos que presentan resonancia amplia responden aún a fuerzas excitantes de frecuencia bastante diferente a la suya.

No se crea que la resonancia es un fenómeno limitado a los cuerpos sólidos, pues los gases contenidos en un cuerpo hueco se comportan de la misma manera. Esto puede verse tomando una botella vacía y soplando sobre su boca: dará un sonido, no muy musical, pero de frecuencia bien definida, que puede elevarse echando agua en la botella, o disminuírse cubriendo parcialmente la boca de la botella con una cartulina. Supongamos que agregando agua a la botella, hemos logrado que la frecuencia del aire que contiene sea igual a la de un diapasón y por lo tanto que presente resonancia cuando éste es excitado. Si cambiamos la frecuencia del diapasón en 15 ó 20 ciclos, veremos que el aire de la botella aún resuena claramente para esta nueva frecuencia.

La resonancia de la botella es amplia, como podríamos deducir observando que el sonido que produce cesa casi inmediatamente al cesar el soplo, o sea que el amortiguamiento es grande. Para confirmar aún mejor la diferencia entre resonancia aguda y resonancia amplia, vemos que aunque la botella presenta resonancia para un diapasón de frecuencia bastante diferente que la suya (resonancia amplia), dicho diapasón no es capaz de actuar como resonador si soplamos sobre la botella.

Si sumergimos un diapasón en agua u otro líquido de densidad similar o mayor, aumenta de tal manera el amortiguamiento de sus vibraciones, que presenta resonancia amplia.

26. RESONADORES DE HELMHOLTZ Y DE KOENIG. CAPSULA MANOMETRICA. — Los *resonadores de Helmholtz* son cuerpos huecos de forma casi esférica que se utilizan para analizar complejos sonoros: se construyen generalmente de bronce o de latón. Su funcionamiento es sencillo: poseen dos aberturas, una relativamente grande donde son captados los sonidos y una más pequeña situada en el extremo de un conducto cónico, que se introduce en el oído. Cuando la frecuencia natural de la masa de aire contenida en el resonador es igual a la de uno de los sonidos captados, éste es reforzado grandemente.

Para utilizar con provecho los resonadores de Helmholtz, es menester poseer una colección numerosa pues cada uno responde a un solo sonido; para subsanar este inconveniente, Koenig ideó resonadores de forma cilíndrica que mediante un enchufe telescópico varían de tamaño dentro de ciertos límites, con lo cual pueden utilizarse para varios sonidos.

La *cápsula manométrica* de Koenig, complemento casi indispensable de los resonadores, se compone de una pequeña esfera hueca dividida en dos cámaras "a" y "b", mediante una membrana "m" (fig. 12). Una de las cámaras tiene dos aberturas: la primera "G", conectada con el gas de alumbrado; la segunda "M", con un tubito que actúa como mechero. La otra cámara tiene una sola abertura "R" que se pone en comunicación con un resonador. Las ondas sonoras captadas por el resonador y transmitidas a la cámara "a", se traducen en variaciones

de presión en el interior de dicha cámara que producen vibraciones en la membrana "m". Las vibraciones de la membrana se transmiten a la corriente de gas, produciéndose oscilaciones en la llama. Estas oscila-

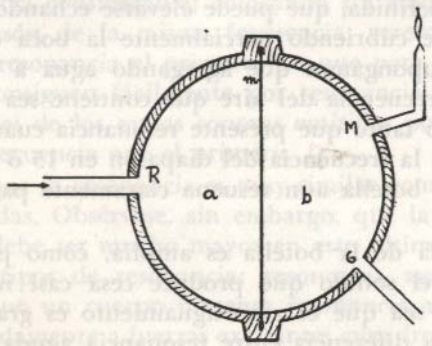


Fig. 12. — Cápsula manométrica.

ciones pueden verse a simple vista pero es frecuente observarlas mediante un espejo giratorio donde se reflejará la llama en forma de banda lisa mientras ésta no oscile, y cuando haya oscilación, en forma de banda serrada.

27. CAJAS DE RESONANCIA. — Se llaman *cajas de resonancia,* los cuerpos destinados a reforzar los sonidos producidos por otros cuerpos o fuentes sonoras. Su nombre induce a error, pues frecuentemente sus vibraciones se deben a oscilaciones forzadas. Las cajas de resonancia son generalmente cuerpos huecos y el aire que contienen desempeña un papel importante.

El refuerzo sonoro aportado por una caja de resonancia, se debe a que la energía, que de otro modo perdería el cuerpo al amortiguarse sus vibraciones, es aprovechada por aquélla y difundida por una mayor superficie vibrante.

La masa de una caja de resonancia influye de manera marcada sobre su comportamiento, pues determina la frecuencia de sus oscilaciones naturales. Convendrá buscar como caja de resonancia un cuerpo cuya frecuencia natural corresponda aproximadamente a la banda o grupo de frecuencias que deben reforzarse. Por esta razón, la caja de resonancia de los instrumentos de cuerda aumenta del agudo al grave, correspondiendo la caja más pequeña al violín, que produce los sonidos más agudos. La viola, que por razones de comodidad es construída con una caja menor que la que le correspondería por su tesitura, tiene un sonido más apagado que los demás instrumentos.

Las cajas de resonancia modifican el timbre de los sonidos que refuerzan, pues para ciertas frecuencias resuenan más que para otras. El conjunto de las frecuencias reforzadas preferentemente por una caja de resonancia constituye lo que se llama su *formante.*

28. RESPUESTA LINEAL. DISTORSION. — Se dice que un cuerpo o un sistema de cuerpos presenta *respuesta lineal,* cuando la fuerza necesaria para obtener desplazamientos es proporcional a los desplazamientos obtenidos. Si aplicamos un movimiento armónico simple a un sistema de respuesta lineal, el movimiento producido será también armónico simple.

Cuando la respuesta dada por un cuerpo o un sistema de cuerpos no es lineal, se dice que hay *distorsión,* habiendo distorsión de frecuencia cuando el sistema responde de distinta manera para frecuencias diferentes y distorsión de amplitud (fig. 13), cuando la amplitud

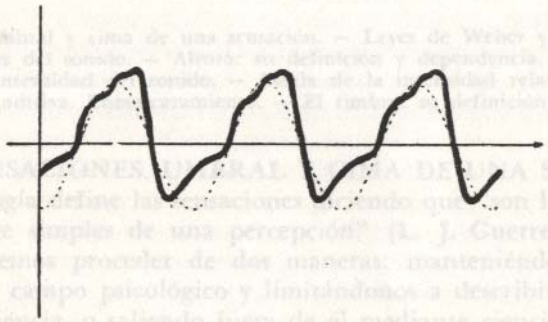


Fig. 13. — Distorsión.

de la respuesta no es proporcional a la amplitud de la fuerza aplicada. Existe también distorsión de fase, cuando las fases de los componentes de una vibración compleja no son conservadas en la respuesta. Si comparamos la fuerza aplicada y el sistema receptor con una imagen y un espejo respectivamente, puede decirse que un sistema lineal corresponde a un espejo plano que refleja las imágenes sin deformación y que un sistema distorsionante corresponde a un espejo que deforma las imágenes en él reflejadas.

Los sistemas distorsionantes presentan un fenómeno curioso cuando inciden simultáneamente sobre ellos dos fuerzas armónicas [1]. En efecto, puede demostrarse matemáticamente que si dichas fuerzas poseen frecuencias "n" y "m", la respuesta consistirá en un conglomerado de frecuencias "n" y "m", (n—m), (n+m), (2n—m), 2n, 2m, 3n... El oído, debido a sus características anatómicas [2] es un sistema muy distorsionante; por lo tanto si las fuerzas de frecuencias "n" y "m" recién mencionadas son dos ondas sonoras, el oído percibirá diversos sonidos que son llamados sonidos resultantes (véase el párrafo 46). La existencia de estos sonidos es demostrable mediante resonadores.

---

[1] Se dice que una fuerza es armónica, cuando aplicada a un sistema no distorsionante origina un movimiento armónico simple.

[2] Véase el apéndice II.

CAPITULO VI

Sensaciones. Umbral y cima de una sensación. — Leyes de Weber y de Fechner. — Cualidades del sonido. — Altura: su definición y dependencia. — Efecto Döppler. — Intensidad del sonido. — Escala de la intensidad relativa: el decibel. — Area auditiva. Enmascaramiento. — El timbre: su definición y dependencia.

29. SENSACIONES. UMBRAL Y CIMA DE UNA SENSACION.

— La Psicología define las sensaciones diciendo que "son los contenidos relativamente simples de una percepción" (L. J. Guerrero). Para su estudio podemos proceder de dos maneras: manteniéndonos estrictamente en el campo psicológico y limitándonos a describir los contenidos de conciencia, o saliendo fuera de él mediante ciencias auxiliares: Física, Anatomía y Fisiología, utilizadas para explicar las sensaciones en base al estudio del estímulo y de la excitación misma.

Si nos limitamos a describir las sensaciones, encontraremos que poseen dos caracteres fundamentales: la cualidad y la intensidad. La *cualidad* de una sensación es su carácter específico propio y da a ésta su nombre. La cualidad es indemostrable, pudiendo solamente intuirse, o sea captarse directamente; no confundiremos nunca la sensación de verde con la de rosa, pero es imposible explicar la diferencia entre ambas.

Las sensaciones pueden agruparse en familias si son semejantes: el verde, el rosa, el amarillo. Cuando las cualidades de dos sensaciones son enteramente distintas, se dice que son de especie diferente: el frío, el negro. Puede pasarse de una sensación a otra, siempre que sean de la misma familia, pero nunca de una especie a otra.

Las sensaciones de una misma cualidad pueden presentarse en nuestra conciencia con fuerza variable: es lo que llamamos la *intensidad*. Puede variar desde un punto mínimo que llamamos *umbral* hasta un punto máximo que llamamos *cima*.

Si queremos explicar una sensación, debemos dividir el proceso de su producción en tres partes: el estímulo, la excitación y la sensación misma. El estímulo es el agente exterior que provoca la sensación: su estudio pertenece al dominio de la Físico-Química; la impresión o excitación es el proceso mediante el cual los órganos de los sen-

tidos captan el estímulo transformándolo en sensación y su estudio pertenece al dominio de las ciencias biológicas (Anatomía y Fisiología). La explicación de una sensación por lo que se refiere a su cualidad, se hace verificando si existe una relación constante entre ésta y el estímulo empleado.

30. LEYES DE WEBER Y DE FECHNER. – El estudio cuantitativo de las sensaciones es mucho más difícil que su estudio cualitativo, porque la medición de los fenómenos psíquicos es forzosamente indirecta, y porque las intensidades psíquicas no son divisibles como las magnitudes físicas y químicas, que pueden medirse y contarse. La intensidad no es realmente separable de la cualidad. o sea que dos sensaciones de igual calidad y diferente intensidad son en verdad dos sensaciones distintas.

Para medir las sensaciones, se procede a determinar la intensidad del estímulo en el umbral y en la cima. No debe olvidarse que los umbrales y cimas se refieren a sensaciones de una cualidad determinada, pudiendo un estímulo que sobrepasa la cima o no llega al umbral para una sensación dada, originar sensaciones de cualidad distinta. Medidos el umbral y la cima, se procede a medir *umbrales diferenciales*, o sea la más pequeña variación en el estímulo capaz de producir variación en la sensación. En base a ésto se miden las variaciones diferenciales de las sensaciones mismas.

Dice la ley de Weber: *"para cada especie sensitiva, existe una relación constante entre las variaciones del estímulo y las variaciones mínimas advertibles en la sensación"*. Ilustremos ésto suponiendo que una persona que escucha dos sonidos de 120 ciclos, uno de ellos de frecuencia variable, advierte una diferencia de altura cuando el sonido de altura variable llega a 125 ciclos. La diferencia absoluta es de 5 ciclos y la diferencia relativa de 4,12 %. Según la ley de Weber, el observador en cuestión, puesto ante dos sonidos de frecuencia 1200, distinguirá una variación de altura cuando la frecuencia de uno de los dos sonidos haya variado, no en 5 ciclos, sino en 4,12 %, o sea cuando el sonido variable llegue a los 1250 ciclos.

Desgraciadamente, esta ley es válida sólo para estímulos de intensidad mediana, pues en las zonas extremas se producen discrepancias grandes entre la ley y la experiencia.

La ley de Fechner intenta precisar más aún la relación entre las sensaciones y los estímulos correspondientes, diciendo *"las sensaciones varían en progresión aritmética cuando los estímulos varían en progresión geométrica"* [1]. Adolece de los mismos defectos que la de Weber.

31. CUALIDADES DEL SONIDO. – Como vimos en el párrafo 7, se distinguen habitualmente en la sensación sonora tres cualidades principales: altura, intensidad y timbre, que por su importancia y di-

[1] Se dice que una sucesión de números forma una progresión aritmética (geométrica) cuando cada término de la sucesión se deduce del anterior sumándole (multiplicándolo por) un número fijo que es llamado "razón" de la progresión.

versidad constituyen otras tantas sensaciones. Es costumbre correlacionar la altura de un sonido con la frecuencia de las vibraciones que lo originan, la intensidad con la amplitud y el timbre con la ley que rige dicho movimiento vibratorio. Todo esto es cierto en primera aproximación, pero analizando más profundamente las sensaciones y sus respectivos estímulos como lo haremos en los párrafos siguientes, veremos que la realidad no es tan sencilla.

La *duración* es una cualidad del sonido que no hemos mencionado hasta ahora pero que posee gran importancia musical pues es la que determina el ritmo, uno de los elementos básicos de la música. La duración de una sensación sonora depende directamente de la duración del movimiento vibratorio que origina el sonido, aunque en algunos casos la sensación persiste después de cesar el estímulo. Cuando la duración es muy pequeña afecta nuestra percepción de la altura: según experiencias realizadas por Ekdahl y Stevens, un sonido de 1000 ciclos cuya duración es de 0,01 segundos produce una sensación cuya altura es igual a la de un sonido de 842 ciclos cuya duración es de 1,5 segundos. Con la intensidad del sonido ocurren fenómenos similares.

Además de las cualidades del sonido ya mencionadas suelen atribuírsele otras como el volumen y la densidad; esto es perfectamente posible pues con dos variables (frecuencia y amplitud), pueden existir infinitas funciones [1] diferentes. El *volumen* es una sensación que aumenta al aumentar la amplitud y disminuye al crecer la frecuencia: una nota de flautín parece tener menos "volumen", menos cuerpo, que una nota de contrabajo de la misma intensidad; al aumentar la intensidad de los sonidos emitidos por un instrumento, parece aumentar su volumen. La *densidad* de un sonido es una sensación que producen ciertos sonidos de ser más compactos, más "densos" que otros; esta sensación parece depender de la frecuencia y aumentar con ella, debido probablemente a la mayor velocidad con que se suceden las vibraciones en los sonidos agudos.

La respuesta del oído a las ondas sonoras no es lineal, por lo cual el sonido escuchado difiere a veces considerablemente del que correspondería a las ondas sonoras emitidas en la fuente. La razón de este comportamiento del oído es clara: para que un cuerpo o sistema de cuerpos pueda presentar respuesta lineal es necesario que pueda desplazarse simétricamente y con igual facilidad a cada lado de su posición de equilibrio. En el oído, ésto no es posible, pues de un lado del tímpano se halla el mango del martillo, unido a su vez a los demás huesecillos del oído medio y del otro lado hay aire; por otra parte, el oído interno introduce nuevas modificaciones en la respuesta debido a la impe-

[1] Se dice que una variable "y" es función de otra variable "x" [simbolizado por $y = F(x)$], cuando a cada valor de "x" corresponden uno o varios valores de "y". Como a "x" se le asignan valores arbitrariamente, se la llama variable independiente, llamándose variable dependiente la variable "y". La palabra "función" designa igualmente a la variable dependiente como a la relación entre ésta y la variable independiente.

dancia de los líquidos linfáticos y sus numerosas asimetrías de construcción, todo lo cual se traduce en una distorsión final considerable [2]. En la figura 13 que representa este fenómeno, la sinusoide trazada con línea punteada representa la onda sonora que llega al oído y la onda en trazo lleno, el sonido que resulta de la distorsión; puede verse que la onda resultante ya no es sinusoidal sino que es una curva compleja, descomponible por el teorema de Fourrier en varias sinusoides, cada una de las cuales corresponde a un armónico introducido por el oído. Estos armónicos introducidos por el oído se llaman *armónicos aurales* (véase el párrafo 37).

32. ALTURA: SU DEFINICION Y DEPENDENCIA. — La *altura* de un sonido es la cualidad de la sensación sonora a que nos referimos cuando decimos que un sonido es más agudo (alto) o más grave (bajo) que otro. Depende principalmente de la frecuencia aunque también es afectada por la amplitud del movimiento vibratorio, como veremos de inmediato. Los sonidos agudos corresponden a los de frecuencia elevada y los graves a los de baja frecuencia. Es curioso constatar que en la mayoría de las lenguas europeas los vocablos "alto" y "bajo" corresponden respectivamente a los sonidos agudos y a los graves; la razón de esta asociación no es muy clara pero ha sido observado que al pedir a varios observadores que localicen la fuente aparente de una serie de sonidos emitidos detrás de una pantalla, tienden a situar el punto de emisión de los sonidos agudos a mayor altura que para los sonidos graves, aunque el punto real de emisión no varíe.

El umbral para la sensación de altura está entre los 16 y los 18 ciclos, denominándose infrasonidos los movimientos vibratorios de frecuencia inferior a ésta. Dicho umbral no es estrictamente el de todas las sensaciones auditivas, pero con frecuencias menores que las citadas, se obtienen sensaciones discontinuas, sin altura precisa que se perciben como pulsaciones aisladas, a veces de carácter táctil. Además, es difícil separar los sonidos graves de los armónicos aurales que se originan en el oído del observador.

La cima de las sensaciones de altura oscila entre los 16.000 y los 20.000 ciclos, variando considerablemente de sujeto a sujeto; la sensibilidad del oído para los sonidos agudos comienza a decrecer a partir de los 30 años.

La amplitud afecta la altura: los sonidos de frecuencia baja (hasta 500 ciclos) parecen más graves cuando aumenta su amplitud, ocurriendo lo contrario con los sonidos de alta frecuencia (sobre los 4.000 ciclos); los sonidos de frecuencia media sufren poca variación. Los sonidos utilizados en música casi no presentan este fenómeno pues generalmente contienen armónicos situados en la región de las frecuencias medias donde no se lo observa; en cambio, es observable sobre los sonidos puros como los que produce el diapasón: pídase a una persona que reproduzca con la voz el sonido producido por un diapasón, colo-

[2] Véase el Apéndice II.

cándolo primero a un metro y luego al lado del oído del observador; el sonido reproducido en segundo término será más bajo que el reproducido primero, pues al acercar el diapasón al observador, los sonidos que emite llegan a éste con más fuerza. Por lo tanto, para controlar la afinación de un instrumento no conviene acercar mucho el diapasón al oído.

Es de gran interés determinar si la relación armónica de dos sonidos depende de su altura o de su frecuencia. Las investigaciones realizadas por Fletcher en este sentido, muestran que es la frecuencia y no la altura la que determina esta relación. Ejecutados sucesivamente, un sonido de 400 ciclos y un sonido de 205, pueden producir la sensación de octava (véase el párrafo 11), pero simultáneamente son discordantes.

Los umbrales diferenciales para la sensación de altura varían considerablemente con la frecuencia y la intensidad de los sonidos estudiados. En la región de los 1000 ciclos, el oído puede percibir diferencias de frecuencia de 3 ciclos (0,3 %), o sea de 1/16 de semitono, mientras que en la región de los 60 ciclos, la sensibilidad es de 1 % o sea de casi un semitono. En condiciones favorables, puede distinguirse en el DO_4 (central) una variación de 1/120 de semitono. Hacia la región aguda, la sensibilidad del oído decae nuevamente.

Para que un sonido produzca una sensación clara de altura, su duración mínima debe ser del orden del vigésimo de segundo.

Se llama oído absoluto la cualidad poseída por ciertas personas de reconocer un sonido basándose únicamente sobre su altura. Las experiencias deben hacerse con sonidos puros sin que el observador intente tararearlos o silbarlos pues de otro modo intervendría en el reconocimiento la memoria muscular. Debe notarse que la mayoría de los músicos que creen poseer oído absoluto, sólo lo poseen para el instrumento que ejecutan y cuando los sonidos varían en forma discontinua como en las escalas musicales. Si las frecuencias varían en forma continua, la individualización de una nota determinada es mucho más difícil. El oído absoluto tiene una utilidad musical relativa, siendo mucho más importante el oído de relación; grandes genios como Schumann y Wagner han carecido de oído absoluto aunque otros lo han poseído en grado muy marcado.

33. EFECTO DOEPPLER. — Al estudiar la relación entre frecuencia y altura, es interesante mencionar un fenómeno fácilmente observable en esta época donde la velocidad de los medios de locomoción aumenta constantemente: el efecto Döppler, llamado así en honor del físico alemán que lo describió por primera vez en 1842.

El efecto Döppler consiste en lo siguiente: cuando entre una fuente sonora y un observador existe un movimiento relativo, sea de alejamiento o de acercamiento, el observador no oye el sonido con la altura que le correspondería por su frecuencia sino que ésta aumenta en el primer caso y disminuye en el segundo. Por ejemplo, si una locomotora pasa a gran velocidad por una estación haciendo sonar su silbato,

los observadores situados sobre los andenes de la estación escuchan dicho silbato como un sonido cuya altura aumenta constantemente mientras la locomotora se acerca, llegando a un máximo cuando la locomotora pasa frente a ellos y disminuyendo luego al alejarse ésta. Si en la estación está sonando una campanilla o cualquier otra señal acústica, los pasajeros del tren realizarán observaciones similares. Esto ocurre porque al aumentar o disminuir la distancia entre la fuente y el observador, éste recibe una cantidad de ondas respectivamente menor o mayor que las que corresponden al sonido producido por aquélla.

34. INTENSIDAD DEL SONIDO. — La *intensidad* del sonido, desde el punto de vista psicológico, es la cualidad de la sensación sonora que queremos indicar cuando decimos que un sonido es más fuerte o más débil que otro; depende principalmente de la amplitud del movimiento vibratorio que origina el sonido.

Llámase *umbral de audibilidad* para un sonido de frecuencia dada, el punto en que la intensidad de dicho sonido no puede disminuirse sin que cese de ser oído. La cima de las sensaciones de intensidad es el punto donde éstas no pueden aumentar sin cambiar de especie, convirtiéndose en sensaciones dolorosas; por lo tanto, el umbral de estas últimas es simultáneamente, cima de las primeras.

El oído puede experimentar sensaciones de intensidad, mismo si la duración del sonido que las produce es de 0.0003 de segundo.

Desde el punto de vista físico, la intensidad del sonido se mide de dos maneras: como intensidad absoluta, expresando la energía de la onda sonora en unidades de potencia o de presión y como intensidad relativa, mediante escalas que se forman tomando como unidad de medida para cada sonido, su intensidad absoluta en el umbral de audibilidad.

La medición de la intensidad absoluta se efectúa mediante un procedimiento ideado por Lord Rayleigh que consiste en suspender un disco liviano dentro del campo de acción de una onda sonora y medir el ángulo girado por aquel que tiende a colocarse normalmente a ésta. Como el ángulo girado por el disco es proporcional a la intensidad absoluta de la onda que sobre él incide, ésta se calcula fácilmente una vez medido dicho ángulo.

La intensidad absoluta necesaria para llegar al umbral de audibilidad, varía enormemente con la frecuencia de los distintos sonidos. Los sonidos graves y sobreagudos consumen gran cantidad de energía, no así los de la región media y aguda para los que el oído es sumamente sensible.

35. ESCALA DE LA INTENSIDAD RELATIVA: EL DECIBEL. — Se define como intensidad relativa de un sonido de frecuencia dada, la relación entre su intensidad absoluta en el instante en que se hace la medición y en su umbral de audibilidad.

Para medir la intensidad relativa de un sonido dado, se establece una escala de la manera siguiente: se mide la intensidad absoluta del

sonido en cuestión en su umbral de audibilidad y a esta intensidad absoluta que designaremos con "x" se le hace corresponder el punto cero de la escala para ese sonido. Una vez establecido el cero de la escala, se dice que la intensidad relativa del sonido en cuestión ha aumentado en *1 decibel* cuando su intensidad absoluta ha aumentado en un 25 % o sea cuando valga 1,25x. Cuando la intensidad absoluta haya aumentado en otro 25 %, la intensidad relativa habrá aumentado en otro decibel, o sea que será de 2 decibeles, procediéndose de igual manera para aumentos ulteriores. El decibel equivale prácticamente al umbral diferencial para las sensaciones de intensidad de muchos sonidos; en efecto, en muchos casos el mínimo de intensidad perceptible equivale a un 25 %.

Ninguna de las escalas de intensidad relativa sobrepasa los 130 decibeles pues este número correspondería a la intensidad relativa de un sonido cuya energía fuera 10 billones de veces mayor que la que poseía en su umbral de audibilidad. Este aumento es el máximo tolerado por el oído, aun en la región media donde su sensibilidad es mayor.

Como vimos en el párrafo anterior, la intensidad absoluta necesaria para llegar al umbral de audibilidad, es diferente para cada sonido; debido a esto, existen tantas escalas de la intensidad relativa como sonidos de diferente frecuencia y por esta razón, no puede compararse la intensidad relativa de dos sonidos de frecuencia diferente. Para remediar esto, ha sido ideada la *escala de la sonoridad*, cuyo punto cero es el umbral de audibilidad para los sonidos de frecuencia 1000. La unidad de esta escala es el *fon*, que es igual al decibel mientras nos refiramos a sonidos de 1.000 ciclos. Un sonido de 1.000 ciclos cuya intensidad relativa es de "x" decibeles tendrá una sonoridad de "x" fones.

Para sonidos cuya frecuencia difiere de 1.000 ciclos, se procede de la siguiente manera: dos sonidos de diferente frecuencia tienen el mismo número de fones cuando su intensidad psicológica es la misma; diremos que un sonido de frecuencia "n" tiene una intensidad de "x" fones cuando se lo oye con la misma intensidad que un sonido de 1.000 ciclos y "x" decibeles.

36. AREA AUDITIVA. ENMASCARAMIENTO. — La figura 14 muestra el área auditiva normal, o sea que representa el total de los sonidos escuchables en función de su frecuencia y de su intensidad. Los datos utilizados para su construcción provienen de investigaciones realizadas por Stevens y Davis, correspondiendo el eje de abscisas a las frecuencias, dadas en ciclos, y el de ordenadas a las intensidades expresadas en decibeles.

El número de sonidos contenidos en el área auditiva normal ha sido calculado por Stevens y Davis en 340.000, basándose sobre los umbrales diferenciales previamente determinados para las sensaciones de altura y de intensidad. Nótese bien que este número se refiere sólo a

sonidos puros en los cuales se varía la altura y la intensidad; variando el timbre, el número de sonidos es prácticamente infinito [1].

La intensidad de los complejos sonoros es difícil de determinar, habiendo tenido poco éxito las determinaciones hasta ahora efectuadas. Cuando la frecuencia de los componentes es suficientemente diferente para que sean estimuladas regiones distintas de la membrana

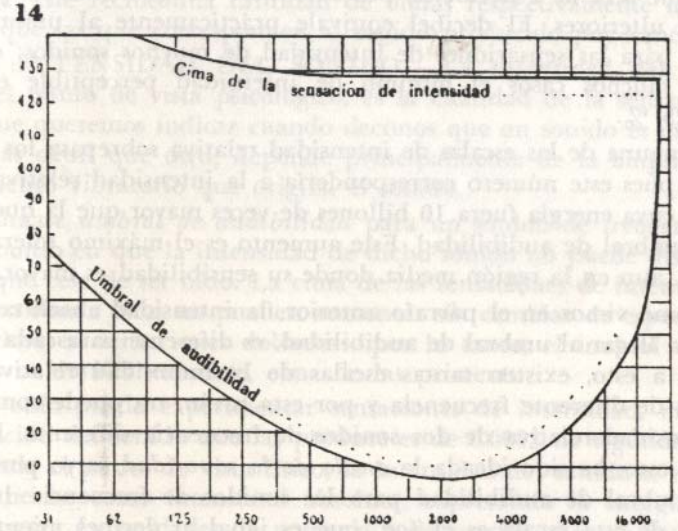


Fig. 14. — Area auditiva normal.

basilar, la intensidad resultante es más o menos la suma aritmética de las intensidades de cada componente. Si las frecuencias son próximas entre sí, se produce un fenómeno llamado enmascaramiento.

El *enmascaramiento* consiste en lo siguiente: consideremos dos sonidos A y B de frecuencias bastante próximas y sea "x" la intensidad absoluta de A en el umbral de audibilidad. Si observamos que mientras se escucha el sonido B es necesaria una intensidad absoluta mayor que "x" para llegar al umbral de audibilidad de A, decimos que el sonido B enmascara al sonido A. El enmascaramiento se mide en decibeles tomando el umbral de audibilidad de A (sin enmascarar) como punto de partida.

Es interesante observar que no tendría objeto que nuestro oído fuera más sensible de lo que ya es; en efecto, con mayor sensibilidad que la que poseemos, oiríamos el "ruido termal" que proviene de los movimientos realizados por las moléculas de los gases que componen la atmósfera, debido a la temperatura.

[1] El número de colores discernibles en las sensaciones visuales considerando los umbrales diferenciales para brillo, saturación y matices, es de la misma magnitud.

37. EL TIMBRE: SU DEFINICION Y DEPENDENCIA. — El *timbre* es la cualidad de la sensación sonora que permite establecer la proveniencia de los diferentes sonidos y ruidos. Los sonidos producidos por un mismo instrumento tienen todos un timbre igual o similar, cualquiera sea su altura e intensidad; por otra parte, dos sonidos de igual altura e intensidad ejecutados por instrumentos distintos serán inconfundibles, pues su timbre será diferente.

Dos movimientos vibratorios de igual frecuencia y amplitud producirán sonidos de la misma altura e intensidad; si estos sonidos difieren en su timbre, es evidente que habrá una tercera característica del movimiento vibratorio que será la que producirá dicha diferencia. Esta característica del movimiento vibratorio es la ley según la cual varía la elongación en función del tiempo en el intervalo de un período.

La representación gráfica de la variación de la elongación en función del tiempo, origina las distintas curvas que caracterizan el timbre de cada sonido. Por esta razón, se dice frecuentemente que el timbre depende de la forma o de la complejidad de la onda sonora. Debe recordarse que las curvas correspondientes a movimientos vibratorios o a las ondas sonoras que éstas originan, no indican el movimiento real de las partículas del cuerpo sonoro o del medio en el cual se propaga la onda sino que representan las variaciones en función del tiempo de la elongación de dichas partículas, mientras que los movimientos se realizan sobre pequeñísimas trayectorias rectilíneas.

Para aclarar esto, recurramos a la sinusoide; sabemos que ésta representa el movimiento de un punto que se mueve con movimiento armónico simple, ya sea éste el punto material de un péndulo que oscila lateralmente sobre un arco de circunferencia o la pesa de un resorte oscilando sobre una línea vertical. Es evidente que la curva representa solamente la variación de la elongación en función del tiempo, pues de otro modo, el movimiento de la pesa y el movimiento curvilíneo del punto material de la pesa debieran representarse de manera distinta.

El físico alemán G. S. Ohm fué el primero en proponer una explicación de las sensaciones tímbricas. Expresa la ley de Ohm que el oído analiza las ondas complejas que sobre él inciden, descomponiéndolas en sus componentes sinusoidales, comportándose como si estuviera constituído por una multitud de resonadores, cada uno de los cuales resuena para un sonido simple determinado; entiéndese por sonido simple el producido por una única onda sinusoidal. Los sonidos simples que componen el sonido complejo se llaman en este caso armónicos.

Se llaman *armónicos aurales* los sonidos generados por la distorsión introducida por el oído. Es fácil demostrar su existencia, creando pulsaciones con sonidos puros de frecuencia próxima.

Al estudiar el timbre de sonidos producidos por percusión es necesario tomar en cuenta la existencia de *parciales transitorios* o fugaces, que aparecen inmediatamente después de la percusión y duran fracciones pequeñas de segundo, modificando grandemente sin embargo, el timbre del sonido.

Hermann von Helmholtz en su libro "Sensaciones sonoras", publicado en 1862, resumió los resultados de 8 años de experiencias realizadas para confirmar la ley de Ohm diciendo: "las diferencias de timbre de los distintos sonidos, provienen únicamente de la presencia de armónicos y de su intensidad relativa". Helmholtz y Ohm sostenían que la fase de los diferentes armónicos no influye en el timbre del complejo, pero este aspecto de su teoría ha sido refutado por observadores más recientes.

En su aspecto fisiológico, las teorías de Helmholtz y Ohm suponen que las fibras de la membrana basilar y los órganos de Corti desempeñan el papel de resonadores para los sonidos simples. La teoría de Helmholtz, muy conveniente bajo ciertos aspectos, no explica con todo varios fenómenos como ser las pulsaciones y el enmascaramiento, razón por la cual ha caído en desuso.

El profesor Fritz Volbach, en su interesante libro "La orquesta moderna", sostiene que hay sólo dos formas básicas en las ondas sonoras: una forma sinuosa y una forma dentada, con todos los posibles tipos de transición, correspondiendo las formas sinuosas a los sonidos de la flauta y la trompa y las formas dentadas al oboe y la trompeta; los armónicos se agregan a estas ondas formando ondas de superposición, pero sin alterar su carácter básico; sostiene además, que los armónicos de un sonido poseen ya el timbre de éste. Según Volbach, no podrá nunca sintetizarse el timbre de la trompeta a partir de parciales de la flauta, por ejemplo, aunque se varíen sus intensidades y se quiten o añadan parciales. Haciendo estudios sobre los instrumentos de viento, deduce que el modo de provocar la vibración del aire influye decisivamente sobre el timbre: si las compresiones y dilataciones se producen suavemente, la forma básica de la onda será sinuosa, evolucionando hacia la forma dentada cuanto más violenta es la producción de las ondas. El estudio de las ondas producidas por explosiones, parece confirmar esta teoría.

Una de las contribuciones modernas que más interesa al estudio del timbre, es la teoría del *formante*. Según la teoría clásica de Helmholtz, el timbre de los sonidos, dependía de la relación entre las frecuencias de los distintos armónicos y la frecuencia de la fundamental, cualquiera sea esta última. La teoría del formante sostiene por el contrario que para cada timbre existe una banda estrecha de frecuencias, de altura absoluta fija, que está siempre presente, cualquiera sea la frecuencia de la fundamental. En el caso del violín, las frecuencias formantes que caracterizan su timbre estarían siempre comprendidas entre 3500 y 5000 ciclos.

Las sensaciones de timbre no son mensurables como las de altura y de intensidad, pues la mayor o menor complejidad de un movimiento vibratorio no constituye una magnitud para la cual pueda establecerse unidad de medida ni escalas. No existen por lo tanto umbral ni cima para las sensaciones de timbre. Para ordenar sonidos según su complejidad, se establece una relación entre la energía total y la energía de todos los parciales menos la fundamental; un sonido con 3 % de distorsión será uno en que la fundamental posee el 97 % de la energía total.

El estudio del timbre se puede realizar por dos vías opuestas y complementarias: por análisis y por síntesis. El primero en analizar sonidos fué Helmholtz que efectuó sus análisis mediante los resonadores por él inventados. El uso de resonadores permite determinar cuales son los armónicos presentes pero no su intensidad; para ésto se recurre actualmente a los analizadores armónicos, que muestran simultáneamente las intensidades de los armónicos componentes mediante diversos circuitos eléctricos. Los resultados de estos análisis son expuestos en lo que se llama *espectros armónicos*. Véanse en los capítulos X y XII los espectros armónicos de los distintos instrumentos: las ordenadas son proporcionales a las intensidades (medidas en decibeles) y las abscisas a las frecuencias de los armónicos.

La síntesis de sonidos es también de gran utilidad, pues permite confirmar los resultados del análisis. Helmholtz y Koenig construyeron un aparato formado por diez diapasones y sus correspondientes resonadores mediante el cual sintetizaron con bastante éxito algunos sonidos. Actualmente se utiliza un aparato llamado "synthephone" que permite sintetizar la mayoría de los sonidos conocidos y crear timbres nuevos.

El "phonodeik", inventado por el físico norteamericano Dayton C. Miller, permite obtener y fotografiar los *oscilogramas* correspondientes a los diversos sonidos. Pueden verse estos oscilogramas en los capítulos recién citados.

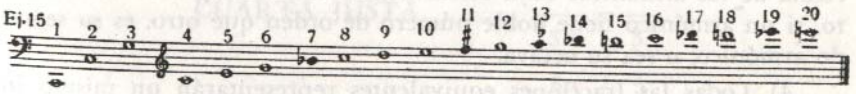
CAPITULO VII

Escala de los armónicos — Intervalos en la escala de los armónicos. — Demostración al piano de la serie armónica. — Características individuales de los 16 primeros armónicos. — Teoremas de Tyndall y de Helmholtz. — Escala de la resonancia inferior. — Origen del acorde perfecto menor. — Pulsaciones producidas por los diferentes intervalos. — Sonidos resultantes. — Sonidos diferenciales producidos por los diferentes intervalos.

38. ESCALA DE LOS ARMONICOS. — Se llama *escala de los armónicos* o escala de la resonancia superior de un sonido puro de frecuencia "n", a la sucesión de sonidos puros cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de "n" (2n, 3n, 4n...). El sonido de frecuencia "n" se llama *fundamental* o *primer armónico* de la escala y los demás sonidos de la sucesión se llamarán *armónicos,* designándose por orden: segundo armónico, tercer armónico, etc.

Conociendo la frecuencia de "n", bastará conocer el número de orden de un armónico para deducir su frecuencia; el tercer armónico del LA_4 de 440 ciclos será $3 \times 440 = 1320$ ciclos (MI_6). La operación inversa se efectúa con igual sencillez: si el LA_5 de 880 ciclos es octavo armónico de un sonido, éste será $880 : 8 = 110$ ciclos (LA_2).

El ejemplo 15 muestra la escala de los veinte primeros armónicos correspondientes al DO_2 como fundamental.



La serie arriba escrita puede transportarse a cualquier altura, según la fundamental a que se la refiera; teóricamente, no tiene fin, pero en la práctica, raras veces sobrepasa el número 16.

En los párrafos subsiguientes, veremos que muchos de los sonidos utilizados en la práctica musical difieren con aquellos que se obtienen mediante la escala de los armónicos. En la mayoría de los casos dicha diferencia es pequeña, no siendo necesario indicarla en la notación;

hacen excepción cuatro sonidos (dentro de los 16 primeros) que difieren en forma más marcada: los armónicos séptimo, undécimo, décimotercero y décimocuarto. Todos ellos suelen indicarse en negrita, llevando encima además los sonidos 11 y 13 una alteración ascendente y una alteración descendente respectivamente (véase el ejemplo 15). Conviene conservar siempre el mismo intervalo entre la fundamental y cada uno de ellos: séptima menor (compuesta) baja, para los sonidos 7 y 14: cuarta justa (compuesta) alta para el sonido 11, y sexta mayor (compuesta) baja para el sonido 13. A partir de la quinta octava los intervalos entre los armónicos sucesivos son menores que el semitono y por lo tanto muchos de ellos no son indicables, ni siquiera de manera aproximada, con la notación actual.

Sobre la escala de los armónicos pueden hacerse las siguientes observaciones:

1) Cada octava respecto de la fundamental, tendrá tantos sonidos como el número de orden del armónico sobre el cual empieza y doble número de sonidos que la octava anterior.

2) Los intervalos entre cada par de armónicos sucesivos disminuyen progresivamente:

$$\frac{2n}{n} = \frac{2}{1} = \text{octava justa}$$

$$\frac{3n}{2n} = \frac{3}{2} = \text{quinta justa}$$

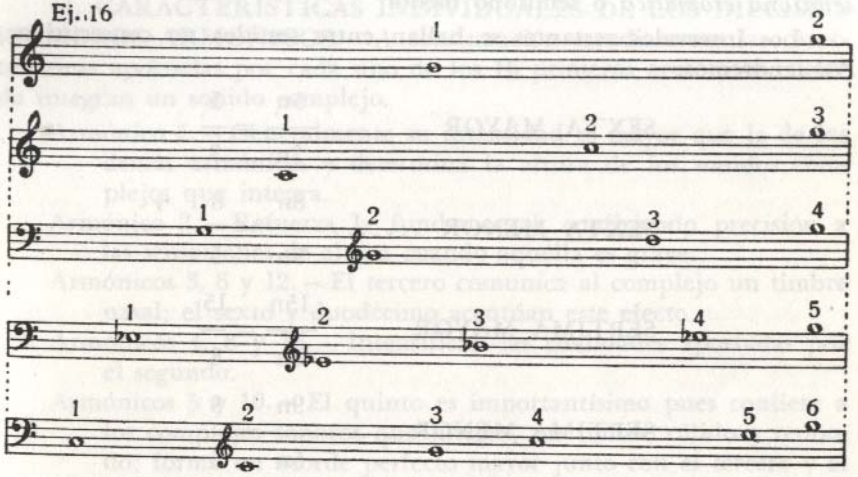
$$\frac{4n}{3n} = \frac{4}{3} = \text{cuarta justa}$$

3) Cuando un intervalo está formado por dos armónicos cuyos números de orden pueden dividirse exactamente, el sonido más agudo será un armónico del más grave y el cociente de la fracción que representa al intervalo será el número de orden del más agudo dentro de la escala de los armónicos cuya fundamental es el más grave. Por lo tanto, si un armónico tiene doble número de orden que otro, es su segundo armónico, o sea su octava.

4) Todas las fracciones equivalentes representarán un mismo intervalo: la quinta justa (3/2) que se halla en primer lugar entre los armónicos 2 y 3, se hallará también entre los armónicos 4 y 6 (6/4=3/2), 6 y 9, etc. En efecto, como vimos en el párrafo 12, los intervalos se miden por la relación de las frecuencias de los sonidos que los forman; las fracciones formadas por los números de orden de dos armónicos corresponden al intervalo que éstos forman, pues representan las frecuencias de cada armónico, divididas por la frecuencia de la fundamental, por ejemplo 6n/5n = 6/5.

Un mismo sonido puede ser armónico de diferentes fundamentales, cambiando desde luego su número de orden. Este hecho es aprovechado corrientemente en muchos instrumentos de cuerda y de viento. Obsérvese en el ejemplo 16 el SOL_5 que puede ser segundo armónico de SOL_4, tercero de DO_4, etc.

Ej. 16



39. INTERVALOS EN LA ESCALA DE LOS ARMONICOS. — Deduciremos a continuación, a partir de la escala de los armónicos las relaciones que caracterizan los principales intervalos.

OCTAVA JUSTA ..... $\frac{2n}{n} = \frac{2}{1}$

QUINTA JUSTA ..... $\frac{3n}{2n} = \frac{3}{2}$

CUARTA JUSTA ..... $\frac{4n}{3n} = \frac{4}{3}$

TERCERA MAYOR .... $\frac{5n}{4n} = \frac{5}{4}$

TERCERA MENOR .... $\frac{6n}{5n} = \frac{6}{5}$

("n" = frecuencia de la fundamental)

Los intervalos 7/6 y 8/7 tienen poca importancia práctica; se llaman tercera mínima y segunda máxima, respectivamente.

A partir del sonido 7 se encuentran en la escala de los armónicos, segundas cada vez más pequeñas; las más importantes son las segundas mayores 9/8 y 10/9, llamadas *tono grande* y *tono pequeño* respectivamente, y la segunda menor 16/15 llamada *semitono diatónico* o semitono mayor. El intervalo 25/24, que como veremos más adelante equivale a la diferencia entre la tercera mayor y la tercera menor, se llama *semitono cromático* o semitono menor.

Los intervalos restantes se hallan entre sonidos no consecutivos. Así tendremos:

$$\text{SEXTA MAYOR} \ldots\ldots \frac{5n}{3n} = \frac{5}{3}$$

$$\text{SEXTA MENOR} \ldots\ldots \frac{8n}{5n} = \frac{8}{5}$$

$$\text{SEPTIMA MAYOR} \ldots\ldots \frac{15n}{8n} = \frac{15}{8}$$

$$\text{SEPTIMA MENOR} \ldots\ldots \frac{9n}{5n} = \frac{9}{5}$$

Los intervalos aumentados y disminuídos se encuentran entre armónicos de número de orden elevado o utilizando los sonidos indicados en negrita: 7/5 = quinta disminuída (pequeña, pues el sonido 7 es algo bajo).

40. DEMOSTRACION AL PIANO DE LA SERIE ARMONICA. — La existencia de los armónicos puede demostrarse sencillamente mediante el piano. Para ésto, se baja una tecla cualquiera (preferiblemente de la región grave), cuidando de que no suene la nota correspondiente. En esta situación, la cuerda puede vibrar libremente y actuar como resonador, pues su apagador está levantado. Tocando luego con fuerza la octava inferior, puede observarse que la cuerda cuya tecla fué bajada silenciosamente produce su sonido propio; esto se debe a que el segundo armónico de la cuerda percutida coincide con el sonido que produce la cuerda que actúa como resonador. La demostración de la existencia de los armónicos de orden más elevado se hace de la misma manera, eligiendo para cada caso la nota conveniente.

La existencia de la escala de los armónicos puede también demostrarse levantando todos los apagadores mediante el pedal derecho y percutiendo con fuerza una cuerda de la región grave. Si luego se pasa la mano suavemente sobre el encordado, podrá observarse que las cuerdas correspondientes a los armónicos cuya fundamental es la nota percutida están en vibración, algunas con fuerza suficiente para que produzcan sonido.

Si se baja silenciosamente una tecla cualquiera y luego se percute con fuerza la cuerda correspondiente a la quinta inferior, podrá observarse que la cuerda libre produce por resonancia un sonido que no es el suyo propio, sino la octava superior. Esto se debe a que actúa como resonador para el tercer armónico de la cuerda percutida que es al mismo tiempo su segundo armónico.

41. CARACTERISTICAS INDIVIDUALES DE LOS DIECISEIS PRIMEROS ARMONICOS. — A continuación estudiaremos las características aportadas por cada uno de los 16 primeros armónicos, cuando integran un sonido complejo.

Armónico 1. — Generalmente su intensidad es mayor que la de los demás armónicos y determina la altura de los sonidos complejos que integra.

Armónico 2. — Refuerza la fundamental, confiriendo precisión a las sensaciones de altura cuando aquélla es grave.

Armónicos 3, 6 y 12. — El tercero comunica al complejo un timbre nasal; el sexto y duodécimo acentúan este efecto.

Armónicos 4, 8 y 16. — Intensifican las cualidades aportadas por el segundo.

Armónicos 5 y 10. — El quinto es importantísimo pues confiere a los complejos sonoros que integra, un timbre cálido y redondo; forma un acorde perfecto mayor junto con el tercero y el primero (fundamental). El décimo armónico intensifica las cualidades aportadas por el quinto.

Armónicos 11, 13 y 15. — Son disonantes y comunican aspereza al conjunto, especialmente los dos primeros. Su intensidad es generalmente pequeña.

El complejo de timbre más cálido se logra juntando los seis primeros armónicos pues forman un acorde perfecto mayor admirablemente equilibrado. Los armónicos superiores al sexto confieren al timbre un carácter algo metálico, aun cuando son consonantes.

42. TEOREMAS DE TYNDALL Y DE HELMHOLTZ. — El teorema de Tyndall, debido al físico inglés Juan Tyndall, dice lo siguiente: "cuanto más simple sea la relación de las frecuencias de dos sonidos, más consonante [1] será el intervalo que forman". De acuerdo con este teorema el orden de los diferentes intervalos simples considerados tradicionalmente como consonancias será:

Octava justa	= 2 : 1
Quinta justa	= 3 : 2
Cuarta justa	= 4 : 3
Tercera mayor	= 5 : 4
Sexta mayor	= 5 : 3
Tercera menor	= 6 : 5
Sexta menor	= 8 : 5

[1] Recuérdese que la noción de consonancia ha sufrido y sufrirá probablemente variaciones considerables.

El teorema de Helmholtz es similar al de Tyndall, pero referido a los acordes en vez de a los intervalos. Dice lo siguiente: "cuanto más simple y proporcional es la numeración de los sonidos que componen un acorde (considerándolos como armónicos de una misma fundamental), más consonante será éste.

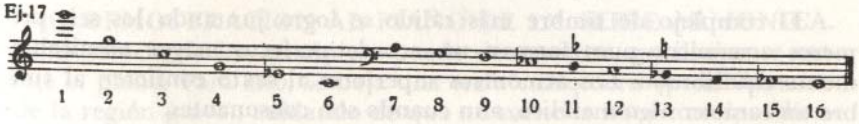
El teorema de Helmholtz falla con el acorde perfecto menor, caracterizado por una numeración más complicada que la que corresponde a los acordes de quinta disminuída y séptima de dominante.

Acorde perfecto mayor	6:5:4 ó 5:3:1
„ „ „ (1ª inversión)	8:6:5
„ „ „ (2ª inversión	5:4:3
Acorde de quinta disminuída	7:6:5
Acorde de séptima de dominante	7:6:5:4 ó 7:5:3:1
Acorde perfecto menor	9:7:6 ó 15:12:10
Acorde de séptima de sensible	9:7:6:5

Es mejor basar el estudio de la consonancia de los acordes e intervalos armónicos sobre los sonidos diferenciales que producen (véase el párrafo 47).

43. ESCALA DE LA RESONANCIA INFERIOR. – Invirtiendo simétricamente a partir de un sonido dado, la escala de la resonancia superior para ese sonido, se obtiene una sucesión similar descendente llamada *escala de la resonancia inferior*. Los sonidos de esta escala suelen llamarse "subarmónicos". En el ejemplo 17 puede verse la escala de la resonancia inferior correspondiente a un SOL_6.

Ej. 17



Es necesario tener cuidado con la notación de los sonidos 11 y 13, pues la alteración que sobre ellos se coloca debe ser descendente en el primer caso y ascendente en el segundo.

Observando la escala de la resonancia inferior, puede verse que sus seis primeros sonidos forman un acorde perfecto menor del cual es quinta, el primer sonido de la serie; en la escala de la resonancia superior, los seis primeros sonidos forman un acorde perfecto mayor, siendo la fundamental de la serie, fundamental del acorde.

Aplicando el teorema de Helmholtz a la escala de la resonancia inferior, pueden escribirse las siguientes relaciones:

Acorde perfecto menor	4:5:6
„ „ „ (1ª inversión)	3:4:5
„ „ „ (2ª inversión)	5:6:8

La relación 4:5:6:7 da un acordé de séptima menor y no de séptima de dominante; el acorde mayor queda relegado como antes el menor (6:7:9 ó 10:12:15).

Existe una importante diferencia entre la escala de la resonancia superior y la escala de la resonancia inferior. En efecto, esta última sólo proviene de especulaciones encaminadas a justificar la importancia del acorde perfecto menor, mientras que la primera es un fenómeno fácilmente observable [1].

44. ORIGEN DEL ACORDE PERFECTO MENOR. – La consideración de la escala de los armónicos origina una cuestión en torno al origen del acorde perfecto menor, pues indudablemente es curioso que siendo de tanta importancia musical tenga una base física tan endeble, sobre todo si se la compara con la del acorde perfecto mayor.

Existen varias teorías que pretenden explicar este hecho. La más antigua, basada sobre algunas proposiciones de Rameau, considera el acorde menor como proveniente de la inversión del orden de las terceras en que se descompone el acorde perfecto mayor: 3ª menor y 3ª mayor en lugar de 3ª mayor y 3ª menor. Otra más reciente, sostenida por Riemann y Van Oettingen, pretende explicar su origen mediante la escala de la resonancia inferior, olvidando la existencia meramente teórica de esta sucesión.

La teoría más lógica e interesante se debe a Jacques Chailley. Considera este autor que el acorde perfecto menor es una consonancia analógica, obtenida al querer colocar un acorde perfecto sobre todos los grados de una escala diatónica, sin salir de los límites de la tonalidad [2].

45. PULSACIONES PRODUCIDAS POR LOS DIFERENTES INTERVALOS. – Estudiaremos ahora las pulsaciones producidas por los principales intervalos; éstas, como sabemos por el párrafo 17, son variaciones periódicas de intensidad debidas a la interferencia.

Los sonidos que corrientemente se utilizan en música, distan mucho de ser puros, pues por el contrario poseen generalmente varios armónicos y debido a ésto, las pulsaciones que no se producirían entre

---

[1] En su Tratado de Composición, Vincent d'Indy cree demostrar la existencia de la resonancia inferior mediante la experiencia siguiente: se toma una cuerda de longitud "L" y se hace vibrar un sexto de su longitud (L/6), con lo que obtiene un sonido de frecuencia "n"; tomando luego longitudes $2L/6 = L/3$, $3L/6 = L/2$, $4L/6 = 2L/3$, $5L/6$ y L, obtiene sonidos de frecuencia n/2, n/3, n/4, n/5 y n/6 que corresponden a los seis primeros sonidos de la resonancia inferior para el sonido "n". El experimento sería concluyente si conservando la longitud L/6 pudieran obtenerse los sonidos correspondientes a las longitudes L/3, L/2, 2L/3, 5L/6 y L, pero desgraciadamente, sólo demuestra que la cuerda obedece a la ley de Pitágoras (párrafo 66), produciendo sonidos más graves a medida que se toman longitudes mayores.

[2] Véase esta teoría, expuesta por el autor en su "Traité Historique d'Analyse Musicale".

UNIVERSIDAD DE CALDAS

los sonidos fundamentales, se producen entre los armónicos superiores de dichos sonidos, aunque desde luego más débilmente [1].

La octava no produce pulsaciones porque los armónicos del sonido más agudo coinciden con los de orden par del sonido más grave. La duodécima sigue a la octava en pureza, no produciendo prácticamente pulsaciones. También la quinta justa puede considerarse como intervalo puro, pues la pulsación que se produce teóricamente entre el séptimo armónico de la fundamental y el quinto de la quinta carece de importancia. Los demás intervalos producen pulsaciones más o menos perceptibles, según ocurran entre armónicos de los sonidos fundamentales o entre éstos mismos.

En la región grave se producen fácilmente pulsaciones, pues de un sonido a otro varía poco la frecuencia; es por esta razón que al orquestar se colocan normalmente los intervalos mayores en la región grave, salvo cuando se desea obtener efectos de confusión.

Mediante las pulsaciones puede establecerse un ordenamiento entre las consonancias, que coincide aproximadamente con el que se observa estudiando los sonidos diferenciales que producen dichos intervalos (párrafo 47) y el que da el teorema de Tyndall.

Las pulsaciones son utilizadas en la práctica musical para control de la afinación. Los instrumentistas que ejecutan sobre instrumentos de entonación libre o variable (párrafo 61), afinan las octavas y las quintas justas buscando que no produzcan pulsaciones; en cambio los instrumentos de entonación fija (piano, órgano, etc.) se afinan sobre la escala templada, controlando el número de pulsaciones de cada quinta templada de la octava central y luego afinando el resto del instrumento por octavas a partir del centro (véanse los párrafos 55, 56 y 57).

46. SONIDOS RESULTANTES. – Hemos visto (párrafo 28) que cuando inciden sobre un sistema distorsionante como el oído, dos sonidos de frecuencias "m" y "n", se producen sonidos armónicos (2m, 2n, 3m,...) y una serie de sonidos de frecuencias m + n, n – m, 2n + m, 2n – m,... llamados *sonidos resultantes*. Dos son las clases de sonidos resultantes: sonidos adicionales y sonidos diferenciales; la intensidad de los sonidos resultantes es proporcional a la de los sonidos que los originan [2].

Se llaman *sonidos adicionales* los sonidos resultantes cuya frecuencia es la suma de las frecuencias de dos sonidos; estos sonidos fueron descubiertos por Helmholtz.

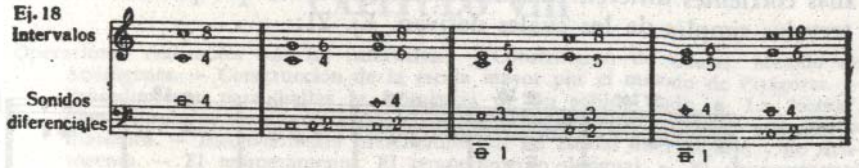
Los *sonidos diferenciales* son los sonidos resultantes cuya frecuencia es la diferencia entre las frecuencias de dos sonidos; fueron descubiertos simultáneamente en 1745 por Sorge, organista alemán, y por

[1] Los experimentos para estudiar las pulsaciones de los diversos intervalos deberán hacerse sobre instrumentos que prolonguen a voluntad los sonidos, pero nunca sobre un piano, pues al disminuir la intensidad de los sonidos pulsantes, dejan de ser perceptibles las pulsaciones.

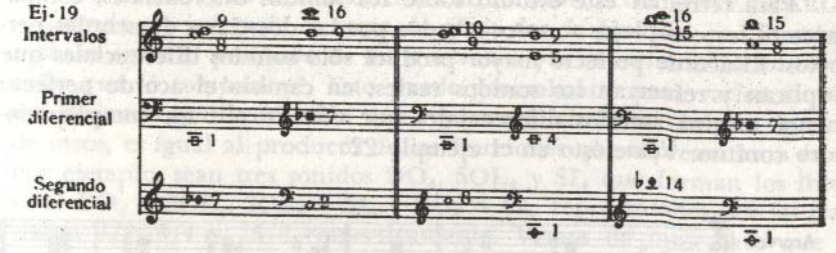
[2] Los sonidos de multiplicación, descriptos por Van Oettingen son simplemente armónicos superiores de los sonidos primitivos.

Tartini, el gran violinista y compositor italiano. Los sonidos diferenciales son los sonidos resultantes de más importancia [1]

47. SONIDOS DIFERENCIALES PRODUCIDOS POR LOS DIFERENTES INTERVALOS ARMONICOS. – El ejemplo 18 muestra los primeros y segundos diferenciales producidos por los diferentes intervalos consonantes; el primer diferencial ha sido designado por una nota cuadrada y el segundo por una nota rómbica. Los intervalos pertenecen a una misma escala de los armónicos (fundamental = DO_2) y han sido ordenados de manera que resalte la progresión en el equilibrio de los complejos sonoros.



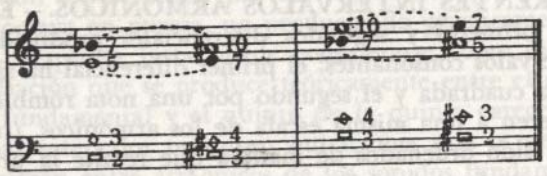
Véase en el ejemplo 19, un análisis similar efectuado para las principales disonancias.



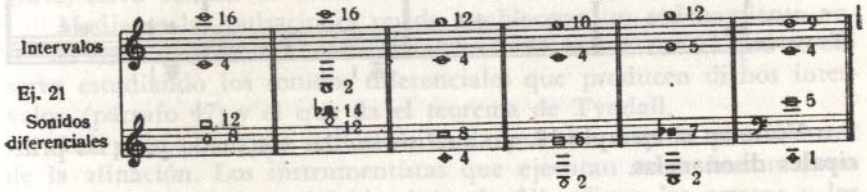
Puede verse que los sonidos diferenciales forman combinaciones completamente disonantes con los sonidos que los producen. La cuarta aumentada y su inversión, la quinta disminuída, merecen especial consideración. Los sonidos diferenciales que producen dichos intervalos, completan con ellos acordes de séptima de dominante en estado fundamental o en segunda inversión; además, si una de las notas es substituída por su enarmonía y se considera el intervalo a partir de una fundamental diferente, se obtienen los mismos acordes de dominante que antes pero en una tonalidad situada a seis quintas de distancia.

[1] Algunos autores mencionan un "falso diferencial" completamente inexistente, diciendo que a veces el número de vibraciones de la resta de los armónicos no corresponde al sonido hallado como diferencial. Esto es absurdo, pues es evidente que si 7n y 5n son los armónicos séptimo y quinto de la fundamental "n", el sonido diferencial resultante será forzosamente 2n (segundo armónico de "n"), puesto que 7n – 5n = 2n.

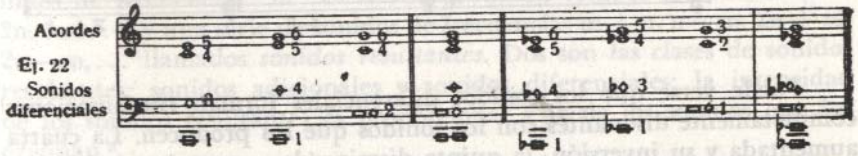
Todo ésto explica en cierto modo la ambigüedad tonal de la cuarta aumentada y la quinta disminuída. Véase el ejemplo 20:



Los sonidos diferenciales originados por los intervalos compuestos más corrientes difieren considerablemente de los que producen los intervalos simples de los cuales derivan. Ej. 21:



Para terminar este estudio sobre los sonidos diferenciales, compararemos los complejos sonoros creados por las dos clases de acordes perfectos. El acorde perfecto mayor produce sólo sonidos diferenciales que duplican y refuerzan los sonidos reales; en cambio el acorde perfecto menor origina sonidos diferenciales que constituyen un complejo sonoro confuso. Véase ésto en el ejemplo 22:



CAPITULO VIII

Operaciones realizables con los intervalos. — Construcción de escalas. Método de Aristógenes. — Construcción de la escala mayor por el método de Pitágoras. — Procedimiento para hallar la frecuencia de un sonido dado. — La "coma". Coma sintónica y coma pitagórica. — Comparación entre ambos tipos de escala diatónica. — Inconvenientes presentados por las escalas de Pitágoras y de Aristógenes. — El temperamento. El temperamento desigual. — El temperamento igual. Procedimiento de Chladni. — Nociones sobre afinación de los instrumentos de teclado. — Escalas formadas por intervalos menores que el semitono templado. — Medición de intervalos según los sistemas de Herschel, Ellis y Yasser.

48. OPERACIONES REALIZABLES CON LOS INTERVALOS.

— *Cuando un intervalo es suma de otros dos, la fracción que lo representa es igual al producto de las fracciones que representan a los intervalos que lo componen*[1]. Esto puede generalizarse para varios sumandos diciendo que la fracción que representa un intervalo que es suma de otros, es igual al producto de las fracciones que representan a éstos. Por ejemplo, sean tres sonidos DO_4, SOL_4 y SI_4 que forman los intervalos $DO_4 - SOL_4$, $SOL_4 - SI_4$ y $DO_4 - SI_4$, representados por las fracciones 3/2, 5/4 y 15/8 respectivamente. Vemos de inmediato que la

[1] Demostración: sean tres sonidos "A", "B" y "C" ordenados del grave al agudo, cuyas frecuencias sean respectivamente "a", "b" y "c"; los intervalos formados por los tres sonidos serán: I_{AB} I_{BC} e I_{AC}. Tendremos además: $I_{AB} + I_{BC} = I_{AC}$. Por ser ascendentes estos intervalos, se caracterizarán por las relaciones siguientes:

$$I_{AB} = \frac{b}{a}; \quad (1)$$

$$I_{BC} = \frac{c}{b}; \quad (2)$$

$$I_{AC} = \frac{c}{a}; \quad (3)$$

Si ahora multiplicamos miembro a miembro las relaciones (1) y (2), tendremos: $I_{AB}.I_{BC} = \frac{b}{a} \times \frac{c}{b} = \frac{c}{a} = I_{AC}$.

tercera fracción equivale al producto de las dos primeras: $3/2 \times 5/4 = 15/8$.

Decimos igualmente: *el intervalo que es igual a la diferencia entre otros dos intervalos, se representa por una fracción que equivale al cociente entre las fracciones que representan a los intervalos que se restan, debiéndose colocar como dividendo la fracción que representa al intervalo más grande.*

De la misma manera, *si un intervalo "A" es "n" veces mayor o menor que otro intervalo "B", la fracción que representa al intervalo "A" será la potencia o la raíz enésima de la que representa al intervalo "B".*

Los intervalos pueden expresarse mediante fracciones como lo hemos hecho hasta ahora o mediante los números, enteros o decimales, que resultan de efectuar los cocientes indicados por éstas. Cuando se desea comparar el tamaño de dos intervalos conviene adoptar la representación decimal, pues para comparar fracciones hay que reducirlas previamente a común denominador; en cambio el sistema fraccionario da una idea más clara sobre su sencillez.

49. CONSTRUCCION DE ESCALAS. METODO DE ARISTOGENES. – Las escalas son sucesiones de sonidos ordenados según su frecuencia. Se caracterizan por los intervalos que forman entre sí los sucesivos sonidos que las constituyen; éstos generalmente se agrupan por series similares de siete, repetidas a distancia de octava. Para su contrucción deben seleccionarse por diversos procedimientos los sonidos que las compondrán, fijando así simultáneamente los intervalos que éstos formarán entre sí.

Para construir la escala mayor, existen dos procedimientos principales: el de Aristógenes y el de Pitágoras.

El procedimiento de Aristógenes consiste en elegir los sonidos de la escala diatónica de manera que los intervalos formados por cada sonido con la tónica de dicha escala sean aquellos que da la escala de los armónicos. La escala así formada recibe varios nombres: *escala de Aristógenes, escala de los físicos,* escala natural y escala de la justa entonación.

Ej. 23

La fracción colocada encima de cada sonido en el ejemplo 23, corresponde al intervalo que éste forma con la tónica.

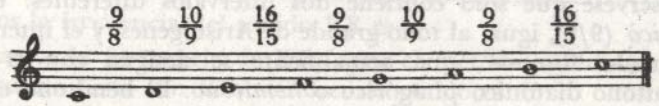
Para establecer las relaciones que guardan entre sí los sonidos de la escala diatónica, se procede por resta de intervalos: DO-MI menos

DO-RE nos dará RE-MI; DO-FA menos DO-MI nos dará MI-FA. Hagamos los cálculos correspondientes:

DO-RE = 9/8 (tono grande)
RE-MI = 5/4: 9/8 = 40/36 = 10/9 (tono pequeño
MI-FA = 4/3: 5/4 = 16/15
FA-SOL = 3/2: 4/3 = 9/8
SOL-LA = 5/3: 3/2 = 10/9
LA-SI = 15/8: 5/3 = 45/40 = 9/8
SI-DO = 2/1:15/8 = 16/15

Estas relaciones pueden verse en el ejemplo 24:

Ej. 24

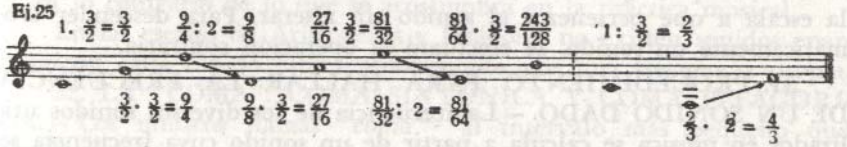


Obsérvese que la escala contiene dos clases de tono, el *tono grande* (9/8) y el *tono pequeño* (10/9), y una clase de semitono: el *semitono diatónico* (16/15). No existen en la escala de Aristógenes intérvalos consecutivos de tono grande; en el tritono la sucesión se forma con dos tonos grandes y un tono pequeño entre medio.

El semitono cromático de la escala de Aristógenes se halla por diferencia entre la tercera mayor y la tercera menor: DO-MI menos DO-MIb será igual a Mib-MI; $5/4:6/5 = 25/24$.

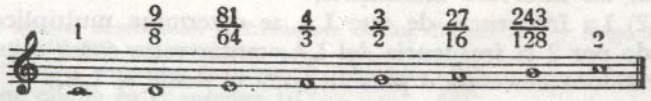
50. CONSTRUCCION DE LA ESCALA MAYOR POR EL METODO DE PITAGORAS. – El procedimiento seguido por Pitágoras para construir la escala diatónica se basa en sucesiones de quintas justas; puede verse en el ejemplo 25:

Ej.25



Ordenando los sonidos del ejemplo anterior se obtiene la escala de Pitágoras:

Ej. 26

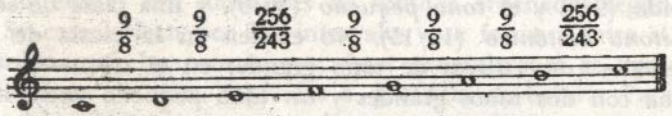


Si repetimos para la escala de Pitágoras el procedimiento utilizado para establecer las relaciones mutuas entre los sonidos de la escala de los físicos, obtendremos:

DO-RE	=	9/8	(directamente)			
RE-MI	=	81/64	:	9/8	=	9/8
MI-FA	=	4/3	:	81/64	=	256/243
FA-SOL	=	3/2	:	4/3	=	9/8
SOL-LA	=	27/16	:	3/2	=	9/8
LA-SI	=	243/128	:	27/16	=	9/8
SI-DO	=	2/1	:	243/128	=	256/243

El ejemplo 27 que figura a continuación muestra las relaciones entre los sonidos consecutivos de la escala diatónica de Pitágoras. Obsérvese que sólo contiene dos intervalos diferentes: el *tono pitagórico* (9/8), igual al tono grande de Aristógenes, y el intervalo 256/243 llamado "limma", que actualmente se designa con el nombre de semitono diatónico pitagórico o *hemitono*. El hemitono es mucho menor que el semitono diatónico, siendo casi igual a 1/3 de tono grande.

Ej. 27



Es conveniente recordar que Pitágoras no conocía el concepto de frecuencia, sino que operaba con cuerdas vibrantes deduciendo estas relaciones de sus longitudes.

El semitono cromático pitagórico o "apotome" se obtiene prosiguiendo hasta llegar al DO #, el método adoptado por Pitágoras para obtener su escala. El intervalo DO-DO # tendrá un valor 2187/2048.

Para ascender cromáticamente un sonido se lo multiplicará por la fracción que representa el semitono cromático, eligiendo ésta según la escala a que pertenezca el sonido sin alterar. Para descender cromáticamente un sonido, se efectuará la operación contraria.

51. PROCEDIMIENTO PARA HALLAR LA FRECUENCIA DE UN SONIDO DADO. — La frecuencia de los diversos sonidos utilizados en música se calcula a partir de un sonido cuya frecuencia se fija por convención; nosotros tomaremos el LA_4 de 440 ciclos.

Para calcular la frecuencia de un sonido cualquiera de la escala diatónica se procede de la manera siguiente:

1) Se toma el LA que forme con el sonido cuya frecuencia se busca, un intervalo ascendente;

2) La frecuencia de este LA se determina multiplicando o dividiendo por 2 la frecuencia del LA_4 tantas veces como octavas se hayan ascendido o descendido para llegar a él desde el LA_4;

3) Una vez determinada la frecuencia del LA anteriormente mencionado, se la multiplica por la fracción que corresponde al intervalo formado por dicho LA con el sonido cuya frecuencia se busca. El producto obtenido será la frecuencia buscada [1].

Determinemos la frecuencia del sonido SOL_3:

1) El LA que debe considerarse es LA_2 que forma con SOL_3 una séptima menor;

2) La frecuencia de LA_2 será: 440 (2.2) = 110 ciclos;

3) La fracción que corresponde a la séptima menor es 9/5, por lo tanto la frecuencia del SOL_3 será: 110.9/5 = 198 ciclos.

Cuando se busca la frecuencia de un sonido alterado se procede en primer lugar haciendo caso omiso de la alteración y luego se multiplica o divide por la fracción 25/24 que representa el semitono cromático, según que la alteración sea ascendente o descendente.

Hallemos la frecuencia del sonido RE $\#_7$:

1) Buscamos la frecuencia de RE_7 (por el método anterior): LA_6 forma una cuarta justa con RE_7; tendremos por lo tanto:

$$440.2.2 = 1760;\ 1760.4/3 = 2346{,}66 \text{ ciclos} = RE_7;$$

2) Para ascender un semitono cromático, multiplicamos por 25/24:

$$2346{,}66.25/24 = 2444{,}43 \text{ ciclos} = RE\ \#_7.$$

Todos los cálculos que hemos realizado, han sido hechos en base a la escala de los físicos. Para obtener los valores correspondientes a la escala pitagórica, deben sustituirse en los cálculos, las fracciones correspondientes.

Si se halla por estos procedimientos la frecuencia de dos sonidos que habitualmente se toman como enarmónicos, puede observarse que no coinciden.

Hallaremos la frecuencia de los sonidos LA $\#_4$ y SIb_4:

$$LA\ \#_4 = 440.25/24 = 458{,}33 \text{ ciclos};$$

$$SIb_4 = 440.9/8 = 495;\ 495{:}25/24 = 475{,}2.$$

Debe observarse que la frecuencia del LA # es menor que la del Sib, o sea lo contrario de lo que se acostumbra en la práctica musical.

En las escalas de Aristógenes y Pitágoras no existen sonidos enarmónicos; cada sonido estará representado por una frecuencia propia.

52. LA "COMA". COMA SINTONICA Y COMA PITAGORICA. — Los músicos llamas *"coma"* [2] al intervalo más pequeño que puede percibirse en la práctica musical. Los físicos llaman *coma sintónica* al mismo intervalo y lo obtienen por diferencia entre el tono grande y el tono pequeño:

9/8:10/9 = 81/80. La coma es nueve veces menor que el tono grande (más exactamente nueve veces y media) [3].

---

[1] Algunos autores determinan la frecuencia de los diversos DO y luego hacen el cálculo a partir del DO más conveniente.

[2] Algunos autores conservan la ortografía primitiva de la palabra: "comma".

[3] Véase este cálculo en el apéndice III.

La *coma pitagórica* es un intervalo muy pequeño. Se lo obtiene por diferencia entre un intervalo de 7 octavas sobre una nota cualquiera y uno de 12 quintas justas con idéntico punto de partida; por ejemplo, entre los intervalos $DO_0 - DO_7$ y $DO_0 - SI\ \#_6$. Haciendo el cálculo obtendremos:

12 quintas justas = $(3/2)^{12}$; 7 octavas = $(2/1)^7$;

Coma pitagórica = $(3/2)^{12} : (2/1)^7 = 3^{12} : 2^{19} = 531441/524288$.

Podemos generalizar la noción de coma en base a la de coma pitagórica, diciendo que es la diferencia entre un número "q" de quintas y un número "p" de octavas. Como esta diferencia no es nunca nula, pero conviene que sea lo más pequeña posible por razones que daremos más adelante (párrafo 55), podemos reducir el problema de la coma a encontrar los valores de "p" y "q" que den a la diferencia entre 2^p y 3^q un valor absoluto mínimo.

53. COMPARACION ENTRE AMBOS TIPOS DE ESCALA DIATONICA.— La tabla III que figura a continuación, muestra las fracciones que corresponden a los diversos intervalos en la escala de Aristógenes y en la de Pitágoras.

Puede verse que la tercera, la sexta y la séptima mayores son algo más grandes en la escala pitagórica que en la de Aristógenes. La diferencia entre los intervalos de una y otra escala, aunque pequeña, tiene

TABLA III

NOTA	Intervalo formado con la tónica		Intervalo formado con la nota precedente	
	Escala de Aristógenes	Escala de Pitágoras	Escala de Aristógenes	Escala de Pitágoras
DO	1	1	—	—
RE	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$
MI	$\frac{5}{4}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$
FA	$\frac{4}{3}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{256}{243}$
SOL	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$
LA	$\frac{5}{3}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$
SI	$\frac{15}{8}$	$\frac{243}{128}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$
DO	2	2	$\frac{16}{15}$	$\frac{256}{243}$

gran importancia estética y musical; en efecto, puede observarse que los buenos ejecutantes (nos referimos a cantantes o instrumentistas que ejecutan sobre un instrumento de entonación libre), tienden a adoptar los sonidos de la escala de Aristógenes cuando ejecutan notas cuya función es armónica, adoptando por el contrario los sonidos de la escala Pitagórica cuando las notas desempeñan una función melódica. Esto se debe a que los armónicos de los sonidos pitagóricos producen pulsaciones con los armónicos de los demás sonidos: la tercera mayor pitagórica, por ejemplo, es mucho más áspera que la tercera mayor de Aristógenes, pues el cuarto armónico de la tercera produce pulsaciones marcadas con el quinto armónico de la fundamental.

54. INCONVENIENTES PRESENTADOS POR LAS ESCALAS DE PITAGORAS Y DE ARISTOGENES. — Las escalas recién estudiadas se prestan admirablemente y conviene utilizarlas para ejecutar música escrita para instrumentos o conjuntos de instrumentos de entonación libre; pero por las razones que expondremos a continuación no convienen a los instrumentos de teclado.

Supóngase que se ejecuta sobre un violín un fragmento musical escrito en Do Mayor y calculemos la frecuencia de algunos de los sonidos de la octava del DO_4 en base a la escala de Aristógenes: si $DO_4 = 264$ ciclos, tendremos: $RE_4 = 264.9/8 = 297$ ciclos; $MI_4 = 264.5/4 = 330$ ciclos; $LA_4 = 264.5/3 = 440$ ciclos. Al cabo de cierto tiempo supongamos que la música modula a Re Mayor; calculemos ahora la escala diatónica correspondiente a la nueva tonalidad, basándonos sobre el valor de $RE_4 = 297$ ciclos, que obtuvimos como segundo grado de la escala de DO_4. Tendremos entonces:

$MI_4 = 297.9/8 = 334{,}12$ ciclos; $LA_4 = 297.3/2 = 445{,}5$ ciclos; habrá además necesidad del FA # y del DO #, con lo cual vemos que para una sencilla modulación necesitamos cuatro sonidos nuevos.

Se comprende fácilmente que si esto ocurre al realizar una única modulación, el problema se vuelve complicadísimo si el número de modulaciones aumenta; puede calcularse que para modular libremente según la escala de Aristógenes, cada octava debería contener 72 notas diferentes. Esto puede lograrse sobre el violín o sobre instrumentos donde no están fijados los sonidos, pero sobre un piano sería materialmente imposible, pues aunque es posible construir teclados con 72 notas por octava, nuestras manos no podrían utilizarlos.

La escala de Pitágoras que contiene una sola clase de tono, no ofrece tantos inconvenientes, pero como vimos ya, produce pulsaciones.

Estos problemas no tienen solución total, razón por la cual han sido adoptadas distintas soluciones parciales que estudiaremos en los párrafos sucesivos bajo el nombre general de temperamento.

55. EL TEMPERAMENTO. EL TEMPERAMENTO DESIGUAL. — El *temperamento* es una fórmula de transacción entre la escala de la justa entonación y la escala pitagórica por una parte, y la comodidad y posibilidades manuales de los músicos por otra. La acción de

establecer el temperamento, se llama *templar la escala;* para ésto, conociendo el valor de la coma (véase párrafo 52), se reparte dicho intervalo entre las quintas necesarias para formar la escala de manera que el intervalo formado por la sucesión de quintas ("q" quintas) sea igual al que forma la sucesión de octavas ("p" octavas). Al efectuar el temperamento, las quintas justas se transformarán en *quintas templadas.*

Si el intervalo formado por la sucesión de "p" octavas es menor que el que forma la sucesión de "q" quintas, la coma será una coma por exceso, y para quitar dicho exceso se restará a cada quinta justa un intervalo igual a la coma dividida por el número de quintas "q". La quinta templada será en este caso menor que la quinta justa; éste es el caso de la coma pitagórica. Si la coma fuera una coma por defecto, las quintas templadas serían mayores que las quintas justas [1].

Estudiaremos ahora brevemente los dos sistemas de temperamento más importantes: el temperamento desigual y el temperamento igual.

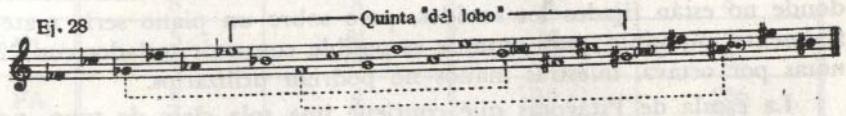
El *temperamento desigual,* llamado también sistema del tono medio, fué aplicado empíricamente al comenzar el siglo XVI y expuesto con claridad por Francisco Salinas, el organista español ciego. Fué utilizado hasta mediados del siglo XIX, pese a que el temperamento igual era ya conocido en 1482.

Para templar la escala según el temperamento desigual, se toma una sucesión de cuatro quintas justas que se reducen de manera que la sucesión de cuatro quintas templadas dé la tercera mayor de Aristógenes y no la de Pitágoras. La quinta templada en este sistema será un intervalo cuatro veces menor que 5, o sea que se expresará como:

$$\sqrt[4]{5} = 1{,}459535.$$

Una vez establecido el valor de la quinta templada, se realizará un ciclo de doce quintas templadas que parte del MIb y termina en el SOL #.

Ej. 28



Para cerrar el ciclo es necesario tomar por enarmonía uno de los sonidos y formar una quinta con el sonido inicial; esta quinta es más grande que las otras, produciendo numerosas pulsaciones, razón por la cual se llamó "quinta del lobo", pues los organistas comparaban su desafinación con un aullido. No es forzoso comenzar el ciclo de quintas sobre MIb, pues cualquiera puede ser el punto de partida (véase el ejemplo 28), aunque siempre será necesario cerrar el ciclo con una "quinta del lobo". Comenzando el ciclo sobre el MIb, se puede tocar con tolerable afinación en las tonalidades que no pasan de dos alteraciones en la armadura de clave. Para tocar en otras tonalidades sería necesario disponer el ciclo de otra manera.

[1] En ciertas obras, las comas por defecto se miden como intervalos ascendentes o sea como comas por exceso respecto del sonido más grave.

El nombre de temperamento desigual que se da a este sistema, proviene precisamente de que las quintas que lo componen no son todas iguales. Puede verse que este sistema es muy defectuoso, válido sólo para tocar en algunas tonalidades y que en rigor no merece ni siquiera el nombre de temperamento. Tardó mucho en ser suplantado por el temperamento igual, debido principalmente a que es más fácil de establecer, pues en la práctica puede obtenerse achicando empíricamente las quintas justas y dejando que la "quinta del lobo" absorba los errores cometidos.

Entre la abolición del sistema del tono medio y la implantación del temperamento igual florecieron sistemas provisorios como ser aquel en que se construían instrumentos que contenían una tecla para el RE # y otra para el MIb.

56. TEMPERAMENTO IGUAL. PROCEDIMIENTO DE CHLADNI. — El sistema del temperamento igual, practicado ya empíricamente por los vihuelistas españoles, fué sistematizado en 1482 por el teórico Bartolomé Ramos de Pareja, pero tardó muchísimo en imponerse debido a la dificultad de establecerlo. Debe su nombre a que todos los semitonos de la escala templada según este sistema, son iguales. Quien consagró este sistema fué Juan Sebastián Bach al escribir el "Clave bien Templado', compuesto por preludios y fugas en todas las tonalidades mayores y menores.

Estudiaremos primero la manera de establecer este temperamento y luego analizaremos sus ventajas y deficiencias.

Consideremos una sucesión de doce quintas $DO_0 - SI\ \#_6$ que forman un intervalo cuyo valor será $(3/2)^{12}$ y una sucesión de siete octavas $DO_0 - DO_7$ cuyo valor será 2^7. La diferencia entre estas sucesiones será un pequeño intervalo llamado, como ya sabemos (párrafo 52), coma pitagórica. La quinta templada se obtendrá achicando cada quinta justa lo necesario para que 12 quintas templadas equivalgan a 7 octavas. Por lo tanto, *cada quinta templada será igual a una quinta justa menos la duodécima parte de la coma pitagórica.* Si calculamos el valor de la quinta templada, obtendremos:

$$\sqrt[12]{7} = 1{,}4983.$$

Partiendo por lo tanto de un DO_4, se multiplicará su frecuencia por 1,4983, con lo cual se obtendrá el SOL_4 templado; multiplicando el valor de éste por 1,4983 se obtendrá el RE_5, cuyo valor deberá dividirse por 2 para obtener el RE_4. Siguiendo este procedimiento se llega eventualmente al $SI\ \#_4$, cuya frecuencia será el duplo de la del DO_4.

El sabio alemán Ernesto Chladni inventó un procedimiento que lleva su nombre, para hallar las frecuencias de cualquier sonido de la escala templada [1]. El procedimiento de Chladni consiste en establecer una progresión geométrica [2] cuyo primer término es 1 y cuyo último término es 2. La razón de la progresión será:

$$\sqrt[12]{2} = 1{,}05946.$$

o sea un número que multiplicado doce veces por sí mismo dará 2. Si atribuímos un valor 1 al DO_4, el DO $\#_4$ será $1.1{,}05946 = 1{,}05946$; el RE_4 será $1{,}05946.1{,}05946 = 1{,}12245$; y así llegaremos al $DO_5 = 2$.

Para calcular la frecuencia de un sonido "n" semitonos más alto que otro, se multiplica la frecuencia del primer sonido "n" veces por 1,05946; para descender "n" semitonos se realizará la operación contraria.

Las ventajas más importantes del temperamento igual son dos: la escala templada se compone en realidad de un solo intervalo (el semitono templado), y cada nota puede substituirse por sus enarmonías. Esta última cualidad es muy valiosa, pues permite al compositor absoluta libertad en la modulación; en este sentido la escala templada ha influído grandemente sobre la evolución de la música, pudiendo decirse que el atonalismo es su consecuencia última.

Entre los inconvenientes de la escala templada, el más importante es que ninguno de los intervalos es justo, salvo la octava: la tercera y la sexta mayores son demasiado grandes y la quinta es demasiado chica, aunque mucho mejor que la que se obtenía con el temperamento desigual. Las séptimas y segundas son también inexactas aunque en menor grado. El acorde perfecto mayor en la escala templada, con tercera demasiado grande y quinta demasiado chica pierde gran parte de su belleza, pues se originan pulsaciones y sonidos diferenciales disonantes que afean el complejo sonoro.

Pese a sus inconvenientes, la escala templada facilita tanto la práctica musical que está profundamente arraigada y probablemente seguirá estándolo por mucho tiempo. Si comparamos el sistema del tono medio con el del temperamento igual, podemos ver que le lleva sólo una ventaja: sus terceras mayores son perfectas, mientras que las de la escala templada son bastante defectuosas.

Como los defectos en las terceras y quintas inciden sobre la perfección del acorde perfecto mayor, se han buscado nuevas escalas templadas que eviten estos defectos. El intento más ingenioso ha sido realizado por el famoso matemático Gerardo Mercator, que propuso en el siglo XVI un sistema basado sobre una sucesión de 53 quintas, que origina una coma pequeñísima; este sistema, llamado a veces "sistema de los 53 grados", permite obtener quintas y terceras mayores casi perfectas. En el siglo pasado fueron construídos dos órganos con 53 teclas por octava, templados según el sistema de Mercator, pero no tuvieron éxito debido a su enorme dificultad de ejecución.

[1] Cualquier escala en la cual se establece un temperamento merece el nombre de escala templada, pero reservaremos este nombre para la escala templada según el temperamento igual.

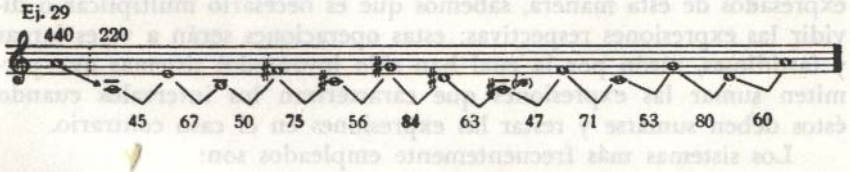
[2] Véase el párrafo 30 (nota al pie).

57. NOCIONES SOBRE AFINACION DE LOS INSTRUMENTOS DE TECLADO. — El sistema del tono medio permitía gran latitud en la afinación, pues la "quinta del lobo" absorbía los errores que se hubieran cometido afinando las otras quintas.

La escala templada no admite, por su misma naturaleza, inexactitudes de esta índole. Para templar científicamente un instrumento de teclado según el temperamento igual, se parte del hecho de que como la quinta templada es algo más baja que la quinta justa, el tercer armónico de un sonido y el segundo armónico de su quinta templada producirán pulsaciones marcadas. Basta determinar previamente el número de pulsaciones que producirá un intervalo para obtenerlo, variando la altura de uno de los sonidos que lo constituyen, hasta que se produzca el número de pulsaciones requeridas por la teoría. El intervalo se elegirá de manera que las pulsaciones puedan contarse directamente por el oído.

El punto de partida para la afinación será forzosamente el LA_4 de 440 ciclos. A partir de esta nota afinaremos el LA_3 a 220 ciclos como su octava inferior. Apliquemos ahora el método de las pulsaciones: el LA_3 de 220 ciclos tiene como tercer armónico MI_5 de 330 ciclos; el MI_4 considerado como quinta templada de LA_3 tendrá como frecuencia: $220.1{,}4983 = 329{,}62$ ciclos, y el segundo armónico de este sonido será: $329{,}62.2 = 659{,}24$ ciclos. Puede verse que entre el segundo armónico del MI_4 templado y el tercero del LA_3 se producirán: $660 - 659{,}24 = 0{,}76$ pulsaciones por segundo. El número de pulsaciones por minuto será: $0{,}76 \times 60 = 45{,}60$, o sea que prácticamente debe afinarse el MI_4 de manera que produzca 45 pulsaciones por minuto con el LA_3; cuando la simple cuenta revele que el número de pulsaciones entre ambos sonidos es 45, el MI_4 formará una quinta templada con el LA_3. Procediendo de esta manera, el afinador templará la octava $LA_3 - LA_4$ en el orden que muestra el ejemplo 29:

Ej. 29



Cada intervalo del ejemplo anterior producirá un número de pulsaciones previamente determinado, que convendrá controlar con un cronómetro.

Una vez establecido el temperamento en la octava central, se afinarán los sonidos restantes por octavas sucesivas respecto de aquéllos.

Por desgracia, en la práctica es siempre difícil templar los instrumentos pese a que la teoría no ofrece ninguna dificultad. En el piano los sonidos disminuyen rápidamente de intensidad, dificultando así la cuenta de las pulsaciones; en el órgano neumático, el temperamento es más fácil de establecer, pero los tubos se desafinan casi constantemente debido a las variaciones de temperatura.

58. ESCALAS FORMADAS POR INTERVALOS MENORES QUE EL SEMITONO TEMPLADO. — Existe actualmente una escuela de compositores que utilizan en sus obras escalas formadas por intervalos menores que el semitono templado; esta escuela recibe el nombre de microtonalista, pudiendo considerarse como su fundador al músico checoeslovaco Alois Haba, quien ha compuesto obras empleando tercios, cuartos y sextos de tono. Debemos observar que lo que es novedad para la música europea, no lo es en modo alguno para la de otras culturas: los árabes, los hindúes y varios otros pueblos emplean escalas que contienen intervalos menores que el semitono.

Los microtonalistas subdividen el tono templado en partes iguales, menores que el semitono, con lo cual se obtienen escalas que contienen 18, 24, 36... notas, según se utilicen los tercios, cuartos o sextos de tono. El cuarto de tono templado tendrá, por lo tanto, un valor de $\sqrt[24]{2}$.

El notable teórico y compositor ruso Jacobo Yasser, ha elaborado una teoría microtonalista interesantísima, expuesta en su libro "Una teoría sobre evolución de la tonalidad", que conduce a una escala de 19 sonidos, distantes entre sí un tercio de tono templado. El aspecto más interesante de su teoría estriba en que jerarquiza los 19 sonidos de su escala en una especie de tonalidad que denomina "supratonalidad", mientras que las escalas obtenidas por el procedimiento de Haba, conducen al atonalismo, debido al principio sobre el cual se basan.

59. MEDICION DE INTERVALOS SEGUN LOS SISTEMAS DE HERSCHEL, ELLIS Y YASSER. — Como vimos en el párrafo 48, los intervalos pueden expresarse indiferentemente por fracciones o por el cociente que estas fracciones indican. Para sumar o restar intervalos expresados de esta manera, sabemos que es necesario multiplicar o dividir las expresiones respectivas; estas operaciones serán a veces largas y fastidiosas, razón por la cual han sido inventados sistemas que permiten sumar las expresiones que caracterizan los intervalos cuando éstos deben sumarse y restar las expresiones en el caso contrario.

Los sistemas más frecuentemente empleados son:

1) Sistema de Herschel: divide la octava en 1000 "milioctavas". Cada milioctava = $\sqrt[1000]{2}$.

2) Sistema de Ellis: divide la octava en 1200 "cents". Cada cent = $= \sqrt[1200]{2}$; 1 semitono templado = 100 cents.

3) Sistema de Yasser: divide la octava en 600 "centitonos". Cada centitono = $\sqrt[600]{2}$; 1 semitono templado = 50 centitonos.

Estos sistemas se utilizan muchísimo en musicología por su simplicidad, pues permiten comparar rápidamente el tamaño de los intervalos en las escalas utilizadas por los diferentes pueblos.

El sistema más difundido es el de Ellis, que divide el semitono templado en 100 "cents". Calculemos el valor en "cents" de la quinta justa templada: la quinta comprende siete semitonos templados y por lo tanto valdrá: $7 \times 100 = 700$ cents. Podríamos haberla obtenido como suma de la tercera mayor y la tercera menor:

tercera mayor = 4 semitonos = 400 cents;

tercera menor = 3 semitonos = 300 cents;

luego, la quinta justa templada = $(4+3)$ semitonos = $(400+300)$ cents = 700 cents.

Es evidente que la escala de la justa entonación o cualquier otra escala dará intervalos diferentes a los de la escala templada. La cuarta justa del sistema de Aristógenes vale 498 cents; la quinta justa 702 cents.

CAPITULO IX

Clasificación usual de los instrumentos. — Clasificación de los instrumentos según Gevaert. — Clasificación de los instrumentos según Hornbostel y Sachs. — Constitución de las cuerdas musicales. — Vibraciones de las cuerdas musicales. Nodos y vientres. — El sonómetro. — Leyes relativas a la vibración de las cuerdas. — Parciales y armónicos producidos por una cuerda. — Ley de Young. — Distribución de la energía sonora entre los diversos armónicos según el modo de excitación de una cuerda. — Vibraciones longitudinales de las cuerdas.

60. CLASIFICACION USUAL DE LOS INSTRUMENTOS. — Los instrumentos musicales se clasifican habitualmente en tres grandes categorías: instrumentos de cuerda, instrumentos de viento e instrumentos de percusión. Esta clasificación deriva de la composición de la orquesta, que queda así dividida en grupos de características musicales bastante homogéneas: timbre, agilidad, expresividad, etc. Es de utilidad en instrumentación y orquestación, y por lo tanto, pese a sus defectos que se verán luego, será la que adoptaremos para nuestro estudio.

Instrumentos de cuerda son aquellos en que el cuerpo sonoro es una cuerda musical. Se los clasifica en tres subgrupos, según el modo de excitación de la cuerda. Los *instrumentos de cuerda frotada* son aquellos en que la cuerda es excitada por fricción, generalmente mediante un arco; los principales instrumentos de este tipo son el violín, la viola, el violoncello y el contrabajo, que forman la base normal de la orquesta. La viola de amor, la viola "da gamba" y otros instrumentos de menor importancia integran también este subgrupo. Los *instrumentos de cuerda punteada* son aquellos en que la cuerda es excitada por punteo (véase el párrafo 76), directamente con la mano o indirectamente mediante un plectro u otros dispositivos; entre estos instrumentos se comprenden el arpa, la guitarra, la mandolina, los laúdes, etc. Los *instrumentos de cuerda percutida* son aquellos en que las cuerdas son excitadas directa o indirectamente mediante martillos. Los instrumentos de cuerda percutida comprenden el piano, el cimbalón y otros instrumentos menos importantes.

Instrumentos de viento son aquellos en que el sonido es producido mediante una masa de aire. Se los divide, muy arbitrariamente

por cierto, en *instrumentos de madera* e *instrumentos de metal.* Entre los primeros citaremos la flauta, el oboe, el clarinete y el fagot, y entre los segundos la trompa, la trompeta, el trombón y la tuba. Al estudiar en detalle los instrumentos de viento, observaremos que constituyen un grupo muy heterogéneo, pues el sonido es obtenido mediante dispositivos sumamente variados, que utilizan numerosos principios acústicos. Muchos instrumentos de viento se escriben habitualmente como instrumentos transpositores [1].

Instrumentos de percusión son aquellos en que el sonido es obtenido mediante percusión. Aunque esta definición comprende también los instrumentos de cuerda percutida, no se los estudia habitualmente dentro de este grupo. Los instrumentos de percusión suelen dividirse en *instrumentos de sonido determinado* e *instrumentos de sonido indeterminado,* según que emitan sonidos de altura definida o indefinida. Entre los primeros se cuentan los timbales, la celesta y las campanas, y entre los segundos el bombo, los platillos y el triángulo.

Se dice que dos o más instrumentos forman una familia instrumental cuando el principio acústico que utilizan es idéntico, estribando la diferencia entre ellos en sus dimensiones, que los hace aptos para producir sonidos de diversas tesituras. La variación en las dimensiones produce a veces pequeñas diferencias de forma que carecen de importancia. Se llama *instrumento tipo* de una familia, al instrumento del cual derivan los demás; cabe recordar que en algunos casos el instrumento tipo ha desaparecido de la práctica orquestal. La designación de los individuos de cada familia se efectúa de varias maneras; es frecuente designar los instrumentos de una familia con la voz humana cuya tesitura es más parecida a la suya, así tenemos: saxófono soprano, saxófono contralto, saxófono tenor, etc. Este sistema de nomenclatura es bastante confuso e irregular; por ejemplo, se designan como trompeta baja y clarinete bajo a dos instrumentos que por su relación con el instrumento tipo, debieran llamarse trompeta tenor y clarinete tenor. Además algunos instrumentos llevan nombres que les son propios, como el corno inglés, que es sencillamente un oboe contralto (párrafo 96).

61. CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS SEGUN GEVAERT. — El musicólogo y compositor belga F. A. Gevaert, ex-director del Conservatorio Real de Bruselas, clasificó los instrumentos en tres grupos:

Instrumentos de entonación libre: comprende aquellos instrumentos que dentro de su tesitura pueden producir sonidos de cualquier frecuencia. Los instrumentos de cuerda frotada: violín, viola, etc., el trombón a vara y algunos instrumentos radioeléctricos recientes, se encuentran en esta categoría que comprende además la voz humana.

Instrumentos de entonación variable: comprende aquellos instrumentos que dentro de su tesitura sólo pueden producir sonidos de ciertas frecuencias, aunque pueden variar éstas ligeramente. La mayoría de los instrumentos de viento están comprendidos en esta categoría.

[1] Véase el apéndice V.

Instrumentos de entonación fija: comprende aquellos instrumentos que sólo pueden producir sonidos de ciertas frecuencias predeterminadas. El ejecutante puede elegir los sonidos que quiera dentro de los que el instrumento produce, pero sin modificar su frecuencia; por ejemplo, el piano, órgano, arpa, etc.

62. CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS SEGUN HORNBOSTEL Y SACHS. — En su magnífica "Historia de los instrumentos musicales", el musicólogo alemán Curt Sachs, observa acertadamente que la clasificación de los instrumentos musicales en instrumentos de cuerda, instrumentos de viento e instrumentos de percusión es sumamente ilógica. En efecto, la clasificación tradicional está hecha en base a tres principios ordenadores diferentes: el cuerpo sonoro en las cuerdas, la fuerza activante en los vientos y la acción que produce el sonido en los de percusión. Esta variedad de principios ordenadores trae consigo desorganización y confusión, siendo por lo tanto necesario clasificar los instrumentos de una manera lógica. La clasificación tradicional excluye además a los instrumentos radioeléctricos de reciente invención, muchos instrumentos primitivos, los instrumentos híbridos como la caja de música y el arpa eólica, y los instrumentos mecánico-eléctricos.

La clasificación de los instrumentos ideada por Erich Hornbostel y Curt Sachs se basa sobre la que adoptó el fundador y curador del Museo Instrumental de Bruselas, Víctor Mahillon, para ordenar la colección a su cargo. Engloba la totalidad de los instrumentos musicales existentes, cualquiera sea su origen y sus características, en cinco grandes clases, que luego se dividen en grupos, subgrupos, géneros, etc. Las cinco clases de instrumentos son:

I) *Idiófonos.* — Los instrumentos de esta clase están formados por materiales naturalmente sonoros. Se los subdivide según el modo de excitación en: raspados, punteados, sacudidos, frotados...

II) *Aerófonos.* — Los instrumentos de esta clase utilizan el aire como fuente de sonido; se los divide en dos subclases: *aerófonos de columna* y *aerófonos libres. Los instrumentos de viento que se utilizan corrientemente en la orquesta son aerófonos de columna.* Constan de un tubo sonoro (véase párrafo 82) cuya columna aérea actúa como cuerpo sonoro; ésta determina la frecuencia de los sonidos emitidos, predominando sobre el dispositivo de excitación.

La frecuencia de los sonidos que producen los *aerófonos libres* depende del dispositivo que excita la columna o masa de aire. El armonio y los tubos de lengüeta del órgano, pertenecen a esta categoría; en estos últimos la columna aérea sólo actúa como resonador. En algunos aerófonos libres primitivos, como los zumbadores utilizados por los indígenas de las Guayanas, el sonido es producido por una lámina que revolea el ejecutante sobre su cabeza.

III) *Membranófonos.* — Los instrumentos de esta clase producen sonido mediante una o más membranas tendidas sobre sendas aberturas. Se los divide en grupos según la posición en que se los ejecuta, según sus dimensiones y la proporción que éstas guardan, según el número de membranas (llamadas comúnmente parches), etc. Casi todos estos instrumentos se designan habitualmente con el nombre de *tambores.*

IV) *Cordófonos.* — En esta clase de instrumentos, el sonido es producido mediante una o varias cuerdas mantenidas a tensión conveniente. Los numerosos cordófonos se reducen a cuatro grandes categorías: *cítaras,* en que las cuerdas están tendidas entre los extremos de una caja o de una tabla; *laúdes,* en que las cuerdas están tendidas por un extremo sobre una caja y por el otro sobre un mango que sobresale de la caja; *liras,* donde las cuerdas están tendidas por un extremo sobre una caja y por el otro sobre un travesaño que une un mango doble o yugo; *arpas,* donde las cuerdas están tendidas en un plano perpendicular a la caja, entre ésta y un travesaño que parte oblícuamente de ella.

V) *Electrófonos.* — En esta clase de instrumentos el sonido es producido o modificado mediante corrientes eléctricas. Se los divide en dos grandes grupos: *instrumentos mecánico-eléctricos,* donde las vibraciones sonoras son producidas por los métodos usuales y luego transformadas en oscilaciones eléctricas, e *instrumentos radio-eléctricos,* basados enteramente en oscilaciones eléctricas.

63. CONSTITUCION DE LAS CUERDAS MUSICALES. — Se llaman cuerdas musicales, los cuerpos sonoros flexibles, cuya longitud es notablemente mayor que las otras dos dimensiones, siendo su sección aproximadamente circular y uniforme. Las cuerdas deben estar tendidas entre dos puntos que limitan al mismo tiempo su longitud vibrante; la tensión a que se las somete, debe hallarse entre ciertos límites, fuera de los cuales no se producirán sonidos musicales.

Los instrumentos que producen sonido mediante una o varias cuerdas se llaman cordófonos o más simplemente instrumentos de cuerda.

Los materiales que se utilizan para hacer las cuerdas musicales son sumamente variados: tripa, acero, seda, plásticos sintéticos y muchas otras substancias. Cuando una cuerda musical de una substancia determinada es envuelta por otra de substancia diferente, se dice que ha sido *entorchada;* el entorchado se hace en general para aumentar el peso de la cuerda con lo cual se obtienen sonidos graves mediante longitudes relativamente pequeñas.

Al estudiar las cuerdas musicales, asumiremos que su densidad lineal es homogénea y que son perfectamente flexibles; estas condiciones no se cumplen en la práctica, pero el error que se comete omitiendo considerar estos factores, puede despreciarse en un estudio elemental como el nuestro.

64. VIBRACIONES DE LAS CUERDAS MUSICALES. NODOS Y VIENTRES. — Los modos de vibración de las cuerdas son varios, pero sólo consideraremos los dos más importantes: longitudinal y transversal. Las vibraciones serán *longitudinales* cuando su dirección sea paralela a la de la cuerda. Las vibraciones serán *transversales* cuando su dirección sea perpendicular a la de la cuerda. Salvo aclaración expresa, las leyes y fenómenos que mencionaremos en los párrafos subsiguientes se referirán a vibraciones transversales.

Las vibraciones de las cuerdas se producen como ondas estacionarias (párrafo 20), pues las vibraciones que se propagan a su largo, se reflejan en los extremos. Por lo tanto, se llaman *nodos* los puntos donde la amplitud de las vibraciones es nula y *vientres* los puntos donde es máxima. Los puntos de fijación de la cuerda serán siempre *nodos.*

Las cuerdas pueden vibrar con toda su longitud (fig. 30a), o divididas en segmentos iguales: mitades (30b), tercios (30c), cuartos (30d)... Cuando la cuerda vibra con toda su longitud, con un vientre en el centro y nodos en los extremos, produce un sonido llamado *fundamental* o primer armónico; la fundamental es el sonido más grave que puede producir la cuerda, siempre que se mantengan constantes los demás factores (tensión, peso, etc....).

30

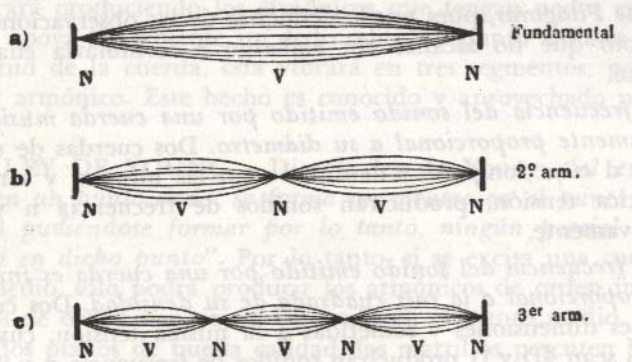


Fig. 30. — Vibraciones de una cuerda.

65. EL SONOMETRO. — El *sonómetro* es un instrumento de física que permite estudiar algunas de las leyes de vibración de las cuerdas. En su forma primitiva de "monocordio", fué utilizado por Pitágoras que mediante él determinó las longitudes de cuerdas correspondientes a los intervalos armónicos más importantes.

Consta el sonómetro de una caja en forma de prisma rectangular que actúa como resonador, sobre la cual están tendidas dos o tres cuerdas; la tensión de las cuerdas se regula mediante clavijas y su longitud vibrante mediante cuñas movibles que se introducen entre la caja y

UNIVERSIDAD DE CHILE

la cuerda. Los sonómetros están generalmente provistos de una escala impresa sobre una cara lateral que permite hallar rápidamente la mitad, el tercio u otras fracciones de la longitud vibrante total de las cuerdas; regulando la tensión de una de las cuerdas de modo que forme un unísono con otra, se obtiene fácilmente un intervalo dado colocando la cuña movible en el lugar que indica la escala.

66. LEYES RELATIVAS A LA VIBRACION DE LAS CUERDAS. — Las leyes que estudiaremos a continuación, llevan habitualmente el nombre de leyes de Mersenne, en honor del Padre Mersenne que estudió en el siglo XVII las leyes que rigen la vibración de las cuerdas musicales. Las proposiciones formuladas por Mersenne en su obra monumental "Harmonía Universal" son algo diferentes a las leyes que enunciaremos inmediatamente, pero las implican.

I. — *La frecuencia del sonido emitido por una cuerda musical es inversamente proporcional a su longitud.* Dos cuerdas sometidas a idéntica tensión, de igual densidad y espesor, cuyas longitudes sean 2L y L producirán sonidos de frecuencia "n" y "2n" respectivamente. La cuerda más corta producirá el sonido más agudo, en este caso la octava de la más grave. Esta ley se llama a veces *ley de Pitágoras,* pues puede deducirse de las observaciones de este filósofo que no alcanzó sin embargo a formularla cuantitativamente.

II. — *La frecuencia del sonido emitido por una cuerda musical es inversamente proporcional a su diámetro.* Dos cuerdas de diámetros 2d y d cuya longitud y densidad sean las mismas, y sometidas a idéntica tensión, producirán sonidos de frecuencia n y 2n respectivamente.

III. — *La frecuencia del sonido emitido por una cuerda es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad.* Dos cuerdas de iguales dimensiones y sometidas a la misma tensión, cuyas densidades sean 4D y D producirán sonidos de frecuencia n y 2n respectivamente.

IV. — *La frecuencia del sonido emitido por una cuerda es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la tensión a que está sometida.* Dos cuerdas de iguales dimensiones y densidad, sometidas a tensiones 4T y T producirán sonidos de frecuencia 2n y n respectivamente.

Recuérdese que las leyes de Mersenne se refieren a la frecuencia de los sonidos emitidos por cuerdas que vibran transversalmente y con toda su longitud.

Las cuatro leyes de Mersenne pueden resumirse en una sola, diciendo: *"las frecuencias de los sonidos que emite una cuerda están en razón inversa a su longitud y espesor, son directamente proporcionales a la raíz cuadrada de la tensión a que está sometida e inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de su densidad".*

67. PARCIALES Y ARMONICOS PRODUCIDOS POR UNA CUERDA. — Como vimos en el párrafo 64, una cuerda puede vibrar con toda su longitud o dividida en segmentos alícuotos. El sonido que emite la cuerda en las condiciones de la figura 30a se llama primer armónico o fundamental y su frecuencia n dependerá de la longitud L, tensión T y peso por unidad de longitud m. Si la cuerda vibrara en las condiciones de la figura 30b, el sonido que produciría tendría frecuencia 2n pues se comportaría como dos cuerdas de longitud L/2; si la cuerda vibrara en tercios, el sonido tendría una frecuencia 3n pues puede considerarse como proveniente de tres cuerdas de longitud L/3.

Los sonidos de frecuencia 2n, 3n, etc.... forman con la fundamental de frecuencia n una serie armónica, reproduciendo así la escala de los armónicos y se llamarán por lo tanto segundo armónico, tercer armónico, etc.... En la práctica, dado que las cuerdas no son perfectamente flexibles (factor despreciable en primera aproximación), los sonidos que producen no forman una serie armónica con la fundamental y por lo tanto corresponde llamarlos más bien parciales.

Apoyando ligeramente un dedo sobre un punto de una cuerda, ésta vibrará produciendo los armónicos que tengan nodos en ese punto; si se apoya ligeramente un dedo sobre un punto situado en 1/3 de la longitud de la cuerda, ésta vibrará en tres segmentos, produciendo el tercer armónico. Este hecho es conocido y aprovechado por los ejecutantes.

68. LEY DE YOUNG. — Dice la ley de Young: *"al excitar una cuerda en un punto dado, se forma un vientre en el punto de excitación, no pudiéndose formar por lo tanto, ningún parcial que tenga un nodo en dicho punto".* Por lo tanto, si se excita una cuerda en su punto medio, sólo podrá producir los armónicos de orden impar, pues todos los de orden par tienen un nodo en el punto medio.

En los pianos de buena calidad, los martillos percuten las cuerdas en una zona que va desde 1/7 a 1/9 de su longitud; debido a esto y conforme a la ley de Young, se eliminan casi totalmente los armónicos 7, 8 y 9.

69. DISTRIBUCION DE LA ENERGIA SONORA ENTRE LOS DIVERSOS ARMONICOS SEGUN EL MODO DE EXCITACION DE UNA CUERDA. — En las cuerdas frotadas la presión del arco y el punto de la cuerda donde se realiza el ataque modifican la energía que reciben los diferentes armónicos.

En las cuerdas punteadas, la energía de los diversos armónicos presentes es inversamente proporcional al cuadrado de su número de orden; el segundo armónico se oye cuatro veces, el tercero nueve veces más débilmente que la fundamental.

En las cuerdas percutidas la intensidad de todos los armónicos sería la misma si la cuerda fuera perfectamente flexible; sin embargo, como ninguna cuerda es perfectamente flexible, los armónicos supe-

riores se eliminan en parte, pero quedando los suficientes para dar un timbre algo agrio, pues son discordantes con la fundamental. En el piano si el martillo fuera completamente duro, el timbre sería desagradable, como ocurre con los pianos viejos en que el fieltro está gastado por el uso, pero habitualmente los fieltros se aplastan contra la cuerda prolongando de ese modo el contacto de ésta con el martillo con lo cual se eliminan prácticamente todos los armónicos superiores.

70. VIBRACIONES LONGITUDINALES DE LAS CUERDAS. — Lo estudiado hasta ahora sobre vibraciones de las cuerdas se refiere a vibraciones transversales, pero como vimos anteriormente también éstas pueden vibrar longitudinalmente. En la práctica ésto se consigue frotando en sentido longitudinal una cuerda tensa con una gamuza; la nota resultante es intensa, pero de timbre desagradable. No se crea que este tipo de vibraciones constituye un modo de vibración excepcional en las cuerdas; por el contrario, son inseparables de las vibraciones transversales dado que para vibrar transversalmente, las cuerdas deben estirar y encogerse alternativamente, originando así vibraciones longitudinales.

Sólo la primera ley de Mersenne se cumple para las vibraciones longitudinales; dos cuerdas cuyas longitudes sean 2L y L, producirán sonidos de frecuencia n y 2n respectivamente cuando realizan vibraciones longitudinales.

Los chirridos que producen a veces los instrumentos de cuerda en manos de ejecutantes inexpertos provienen de este tipo de vibraciones.

CAPITULO X

Instrumentos de cuerda frotada. — El violín. — La viola, el violoncelo y el contrabajo. — El arco. Su acción sobre las cuerdas. — Las violas. Viola de amor y viola "da gamba". — Instrumentos de cuerda punteada. — El arpa. — El clave. — La guitarra, la mandolina y el laúd. — Instrumentos de cuerda percutida. — El piano.

71. INSTRUMENTOS DE CUERDA FROTADA. — Se llaman *instrumentos de cuerda frotada* aquellos que generan sonido mediante cuerdas excitadas por fricción; suele llamárselos *instrumentos de arco* debido a que la fricción es realizada por un arco. Los instrumentos de cuerda frotada que se utilizan actualmente en la orquesta son cuatro: el violín, la viola, el violoncelo y el contrabajo; forman una familia instrumental que por la homogeneidad de su timbre, y la agilidad, expresividad y variedad de sus recursos constituye la base de la orquesta clásica.

La figura 32a representa un violín; la forma de la viola y del violoncelo es semejante a la del violín aunque sus dimensiones son mayores. La forma del contrabajo, como veremos en el párrafo 91 es algo diferente.

La frecuencia de los sonidos que pueden emitir estos instrumentos varía inversamente a su magnitud, o sea que el violín emite los sonidos más agudos y el contrabajo los más graves; la intensidad varía entre límites muy amplios, aunque no alcanza en el fuerte la de los demás grupos instrumentales. Su timbre es cálido y como dijimos ya, sumamente homogéneo, no obstante las numerosas variantes que provienen del modo de atacar las cuerdas y de las características de éstas, levemente diferentes para cada instrumento y en cada una de las cuerdas de un instrumento dado.

Los instrumentos de arco poseen casi siempre cuatro cuerdas, haciendo excepción el contrabajo que ocasionalmente tiene cinco; en cada instrumento la longitud y tensión a que están sometidas las cuerdas es la misma, variando su grosor y su densidad (más exactamente, su masa por unidad de longitud). Las cuerdas se numeran del agudo al grave, llamándose primera la que produce los sonidos más agudos.

En su fabricación se utilizan las substancias más diversas, siendo las más comunes la tripa y el acero; se utilizan también los materiales plásticos y para el entorchado la seda, la plata y el cobre.

Se dice que una cuerda es falsa cuando su masa por unidad de longitud no es constante; las cuerdas falsas no obedecen a la primera ley de Mersenne, debiendo por lo tanto desecharse.

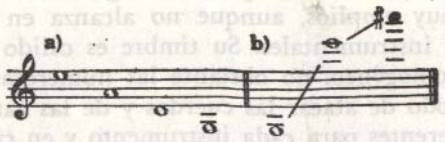
En las condiciones normales de ejecución, la mano derecha maneja el arco, mientras que la izquierda varía la longitud vibrante de las cuerdas con el objeto de obtener los diversos sonidos. Es frecuente puntear las cuerdas de estos instrumentos, indicándose esta manera de obtener sonido con la palabra italiana "pizzicato", que significa "pellizcado". Ocasionalmente las cuerdas se excitan por percusión mediante la baqueta del arco; corresponde a este modo de ejecución la indicación "col legno" [1].

Los instrumentos de arco son preferentemente monofónicos, pero pueden hacer oír simultáneamente dos, tres o cuatro sonidos. Los acordes de tres o cuatro sonidos, ejecutados con arco, deben arpegiarse un poco, pero pueden ejecutarse simultáneamente en "pizzicato".

Según la clasificación de Gevaert, los instrumentos de arco pertenecen al grupo de los de entonación libre; nada más cierto en teoría, pues digitando las cuerdas puede variarse su longitud cuanto se desee, pero en la práctica, las cosas suceden de otro modo, pues no es el oído sino la memoria muscular que debe guiar los dedos hasta el punto preciso en que apoyarán sobre la cuerda. Debido a ésto, para el ejecutante los sonidos de su instrumento tienen en cada cuerda lugares de obtención tan invariables como si fueran producidos por teclas.

72. EL VIOLIN. — El *violín* es el instrumento tipo de la familia de los instrumentos de cuerda frotada. Sus cuatro cuerdas, afinadas por quintas justas, dan "al aire", o sea vibrando con su máxima longitud, los sonidos: MI_5-LA_4-RE_4-SOL_3 (ejemplo 31a); su extensión habitual en la orquesta es SOL_3-MI_7, pero pueden obtenerse de él, sonidos más agudos. (Ej. 31b.)

Ej. 31



La figura 32b representa un corte longitudinal del violín; los nombres que designan sus diferentes partes y las funciones que desempeñan son iguales en los demás instrumentos de la familia.

Dos son las partes principales de que se compone un violín: la *caja* que actúa como caja de resonancia del instrumento y el *mango*,

[1] En italiano: con la madera.

LAMINA I.

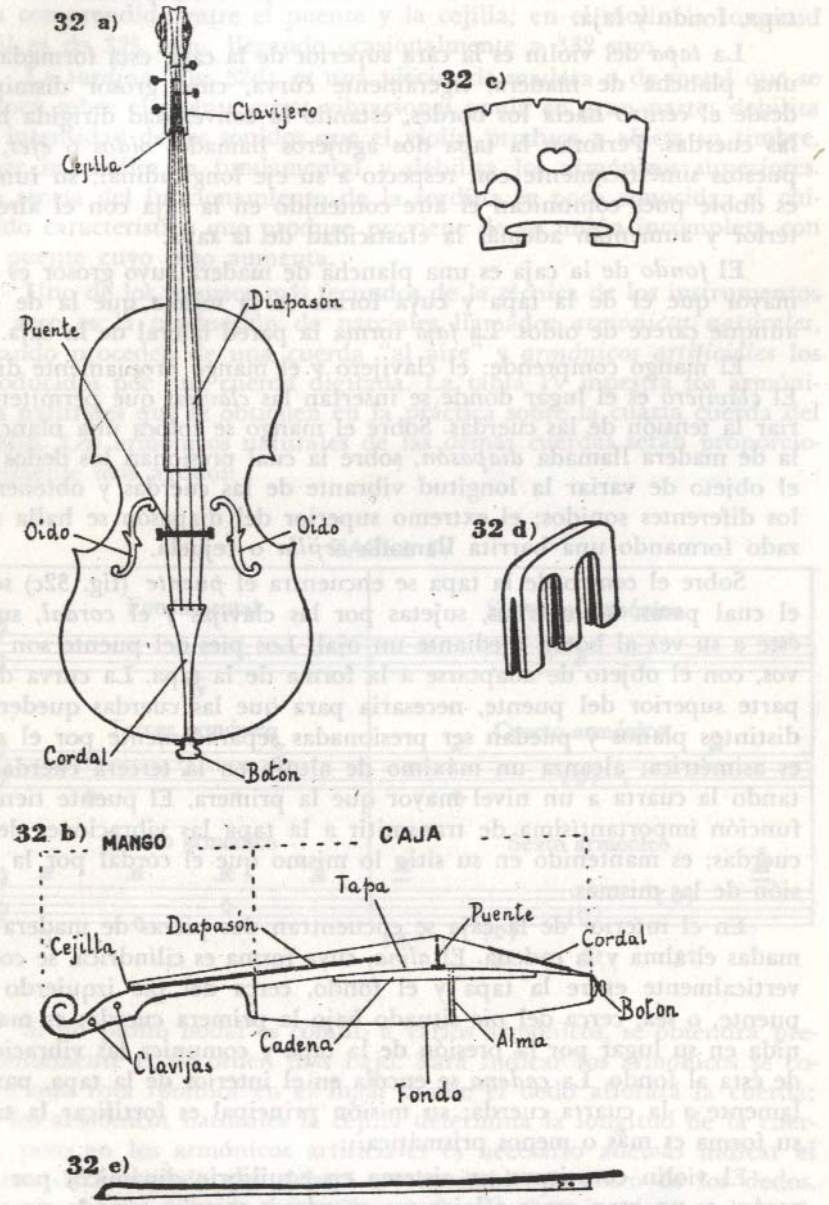


Fig. 32. — Violín:
a) de frente
b) corte longitudinal.
c) puente
d) sordina
e) arco

sobre el cual se tienden las cuerdas. La caja se compone a su vez de tapa, fondo y faja.

La *tapa* del violín es la cara superior de la caja; está formada por una plancha de madera, ligeramente curva, cuyo grosor disminuye desde el centro hacia los bordes, estando la convexidad dirigida hacia las cuerdas. Perforan la tapa dos agujeros llamados *oídos* o *efes,* dispuestos simétricamente con respecto a su eje longitudinal; su función es doble pues comunican el aire contenido en la caja con el aire exterior y aumentan además la elasticidad de la tapa.

El *fondo* de la caja es una plancha de madera cuyo grosor es algo mayor que el de la tapa y cuya forma es la misma que la de ésta, aunque carece de oídos. La *faja* forma la pared lateral de la caja.

El mango comprende: el clavijero y el mango propiamente dicho. El *clavijero* es el lugar donde se insertan las *clavijas* que permiten variar la tensión de las cuerdas. Sobre el mango se coloca una planchuela de madera llamada *diapasón,* sobre la cual presionan los dedos con el objeto de variar la longitud vibrante de las cuerdas y obtener así los diferentes sonidos; el extremo superior del diapasón se halla realzado formando una barrita llamada *cejilla* o cejuela.

Sobre el centro de la tapa se encuentra el *puente* (fig. 32c) sobre el cual pasan las cuerdas, sujetas por las clavijas y el *cordal,* sujeto éste a su vez al botón mediante un ojal. Los pies del puente son curvos, con el objeto de adaptarse a la forma de la tapa. La curva de la parte superior del puente, necesaria para que las cuerdas queden en distintos planos y puedan ser presionadas separadamente por el arco, es asimétrica; alcanza un máximo de altura en la tercera cuerda, estando la cuarta a un nivel mayor que la primera. El puente tiene la función importantísima de transmitir a la tapa las vibraciones de las cuerdas; es mantenido en su sitio lo mismo que el cordal por la tensión de las mismas.

En el interior de la caja se encuentran dos piezas de madera llamadas el alma y la cadena. El *alma,* cuya forma es cilíndrica, se coloca verticalmente entre la tapa y el fondo, cerca del pie izquierdo del puente, o sea, cerca del pie situado bajo la primera cuerda; es mantenida en su lugar por la presión de la tapa y comunica las vibraciones de ésta al fondo. La *cadena* se encola en el interior de la tapa, paralelamente a la cuarta cuerda; su misión principal es fortificar la tapa; su forma es más o menos prismática.

El violín constituye un sistema en equilibrio dinámico; por esta razón, es un gran error aflojar sus cuerdas o sacarlas cuando no se lo ejecuta, pues en poco tiempo queda inutilizado.

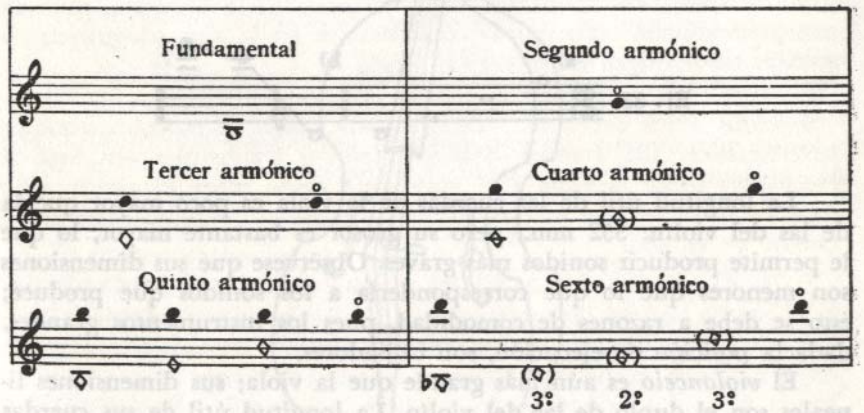
El sonido del violín alcanza la intensidad necesaria gracias a la amplitud de las vibraciones de la tapa; éstas son asimétricas, pues existe un punto casi fijo en el lugar que apoya sobre el alma, quedando casi inmovilizado el pie derecho del puente.

Se llama *longitud útil* de las cuerdas de un instrumento la distancia comprendida entre el puente y la cejilla; en el violín la longitud útil es de 325 mm., llegando ocasionalmente a 332 mm.

La *sordina* (fig. 32d), es una piecita de madera o de metal que se coloca sobre el puente cuyas vibraciones anula en gran parte; debilita la intensidad de los sonidos que el violín produce y afecta su timbre, pues intensifica la fundamental y debilita los armónicos superiores. La teoría del funcionamiento de la sordina es poco conocida; el chirrido característico que produce proviene de su unión incompleta con el puente cuyo peso aumenta.

Uno de los recursos más fecundos de la técnica de los instrumentos de arco es la producción de parciales llamados *armónicos naturales,* cuando proceden de una cuerda "al aire" y *armónicos artificiales* los producidos por una cuerda digitada. La tabla IV muestra los armónicos naturales que se obtienen en la práctica sobre la cuarta cuerda del violín. Los armónicos naturales de las demás cuerdas serán proporcionalmente más agudos.

TABLA IV



Si un punto nodal es común a varios armónicos, se obtendrá preferentemente el de orden más bajo. Para indicar los armónicos se coloca una rota rómbica en el lugar donde el dedo aflorará la cuerda; en los armónicos naturales la cejilla determina la longitud de la cuerda, pero en los armónicos artificiales es necesario además indicar el punto de la cuerda que deberá ser oprimido por otro de los dedos. Cuando el punto donde debe aflorarse la cuerda coincide con el armónico natural a obtenerse, se coloca solamente la nota deseada con un pequeño cero encima.

En la orquesta se utilizan los armónicos artificiales, pero sólo como cuatro armónicos. Se obtiene utilizando el punto nodal más cercano a la cejilla, pues los otros exigen de la mano izquierda extensio:

difíciles o imposibles de lograr. El uso de los armónicos naturales y artificiales extiende el registro agudo del violín hasta el DO_8 y aún más allá.

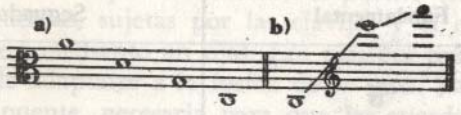
El timbre normal del violín es rico en armónicos; cada cuerda tiene su timbre propio, siendo las más individualizadas la cuarta y la primera. El timbre varía también con los diferentes golpes de arco (párrafo 74), y los diversos efectos: sordina, armónicos, pizzicato, etc.

La mentonera es una pequeña pieza que se fija a la caja del violín o de la viola mediante grampas y que permite sujetar estos instrumentos bajo el mentón.

Para construir un violín se emplean maderas muy distintas: la tapa, el alma y la cadena son de abeto; el mango, el puente y el fondo son de arce; el diapasón y el cordal son de ébano. Se emplean también otras maderas.

73. LA VIOLA, EL VIOLONCELO Y EL CONTRABAJO. — La *viola* es un violín cuyas dimensiones lineales han sido agrandadas en un séptimo; es afinada por quintas justas y sus cuerdas "al aire" producen los sonidos: LA_4-RE_4-SOL_3-DO_3 (ejemplo 33a). La extensión de la viola en la orquesta es DO_3-MI_6 (ejemplo 33b), pero puede producir sonidos más agudos.

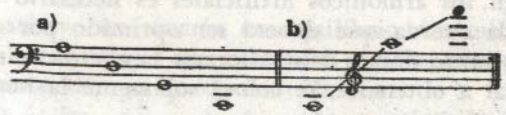
Ej. 33



La longitud útil de las cuerdas de la viola es poco mayor que la de las del violín: 352 mm., pero su grosor es bastante mayor, lo que le permite producir sonidos más graves. Obsérvese que sus dimensiones son menores que lo que correspondería a los sonidos que produce; ésto se debe a razones de comodidad, pues los instrumentos grandes, dada la posición de ejecución, son cansadores.

El *violoncelo* es aún más grande que la viola; sus dimensiones lineales son el duplo de las del violín. La longitud útil de sus cuerdas es de 704 mm. Las cuerdas del violoncelo se afinan por quintas justas y producen "al aire" los siguientes sonidos: LA_3-RE_3-SOL_2-DO_2 (ejemplo 34a); su extensión en la orquesta es: DO_2-LA_5, pero mediante armónicos puede llegar hasta el LA_7 (ejemplo 34b).

Ej. 34



Debido a su tamaño es imposible ejecutarlo como el violín y la viola; se lo apoya sobre el suelo mediante una púa sujetándolo entre las piernas.

Todo lo que se dijo respecto del violín en cuanto a armónicos naturales y artificiales se aplica a la viola y al violoncelo, transportando a la quinta y duodécima graves respectivamente, sin otra reserva que la dificultad, debida a las mayores extensiones necesarias en la mano izquierda.

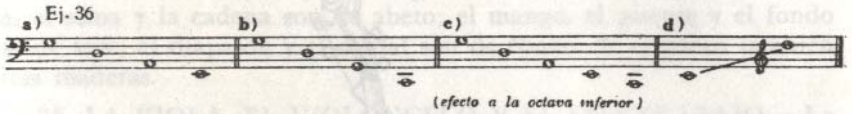
El *contrabajo* es el instrumento de cuerda frotada de tesitura más grave; su forma, como puede verse en la figura 35 no es exactamente

Fig. 35. — Contrabajo.

semejante a la del violín, debido a que pertenece en realidad a la familia cuasi extinta de las violas (véase el párrafo 75). Los rasgos diferenciales más marcados que presenta son: la forma triangular de la caja en la proximidad del mango y la forma del fondo, constituída por dos planos rectos en lugar de una superficie curva única [1].

[1] Actualmente se construyen contrabajos con forma de violín.

Las dimensiones lineales del contrabajo son casi el duplo de las del violoncelo. Posee normalmente cuatro cuerdas afinadas por cuartas justas que dan "al aire" los sonidos: SOL_2-RE_2-LA_1-MI_1 (ejemplo 36a); con el objeto de alcanzar el DO_1 se lo afina a veces: SOL_2-RE_2-SOL_1-DO_1 (ejemplo 36b), o se le agrega una quinta cuerda afinada al DO_1 conservándose para las demás la afinación mencionada en primer término (ejemplo 36c). En la orquesta, la extensión del contrabajo es MI_1-RE_4 (ejemplo 36d), aunque los solistas emplean sonidos mucho más agudos.



Las cuerdas del contrabajo tienen una longitud útil que llegan a los 1008 milímetros y son bastante gruesas; su tensión es tal que se las afina con clavijas a tornillo. Su gran longitud las hace particularmente aptas para producir armónicos.

Los armónicos artificiales no se utilizan en la orquesta, pues exigen generalmente extensiones considerables en la mano izquierda; los solistas los emplean en la región aguda.

Los efectos de pizzicato, sordina, etc., son similares en los tres instrumentos a los del violín. Cada cuerda posee su espectro armónico característico. Las cuerdas dobles, triples y cuádruples son casi tan frecuentes sobre la viola y el violoncelo como sobre el violín; en el contrabajo su empleo es rarísimo en la orquesta, aunque bastante frecuente en el solo.

74. EL ARCO. SU ACCION SOBRE LAS CUERDAS. – El arco es el medio normal de excitación en los instrumentos de cuerda frotada. Se compone de una varilla curva de madera llamada *bagueta* entre cuyos extremos se insertan crines en número suficiente para formar una banda chata. Las crines están tendidas frente a la convexidad de la bagueta. Los extremos del arco se llaman talón y punta respectivamente. El talón es el extremo que empuña el ejecutante; contiene un mecanismo que permite variar la tensión de las crines (figura 32e).

Los arcos primitivos tenían forma distinta, pues su concavidad estaba dirigida hacia las crines; eran además mucho más pesados. Su forma actual, les confiere mayor elasticidad, permitiendo numerosas finezas de ejecución imposibles con el arco antiguo.

El arco del violín tiene una longitud cercana a los 72 cm.; el de viola suele ser algo más largo y pesado, mientras que el del violoncelo mide sólo 67 cm. El arco de contrabajo, bastante más corto y pesado, se asemeja más a los arcos primitivos.

Las crines de los arcos de violín, viola y violoncelo son blancas y finas; las del arco de contrabajo son gruesas y negras. Se untan con

pez para aumentar su adherencia a las cuerdas. Para que las cuerdas sean excitadas de manera conveniente, conviene que el arco forme con ellas un ángulo recto.

Se llaman "golpes de arco" las diversas maneras de atacar las cuerdas. Se dice que una cuerda es atacada *tirando* cuando el arco entra en contacto con la cuerda cerca del talón y es arrastrado hacia la punta. Las cuerdas son atacadas *empujando,* cuando el arco entra en contacto con la cuerda cerca de la punta y es empujado hacia el talón. Estos golpes de arco se llaman también "talón" y "punta".

Estudiemos brevemente la acción del arco sobre las cuerdas. Supongamos que el arco se mueva en una sola dirección con velocidad constante, manteniendo a la cuerda sometida a una tensión invariable y que en un momento dado, la cuerda ha sido arrastrada por el arco hasta un punto que su elasticidad no le permite rebasar: la cuerda permanecería en dicho punto mientras pasara el arco, si las crines de éste no vibraran, pero debido a esta vibración, la cuerda se suelta moviéndose en sentido contrario al anterior, hasta que el arco la retoma, comenzando nuevamente el ciclo. El movimiento de la cuerda es mucho más rápido cuando escapa al arco, que cuando lo acompaña.

El violín y la viola producen sonidos más intensos tirando el arco que empujándolo; lo contrario ocurre sobre el violoncelo y el contrabajo. En efecto, sobre el violín y la viola, al tirar el arco, éste arrastra hacia arriba el pie móvil del puente, situado sobre la cadena, aumentando sus vibraciones; al empujar, dicho pie es aplastado contra la tapa y sus vibraciones son por lo tanto menores. Debido a la posición en que se los ejecuta, el violoncelo y contrabajo producen sonidos más intensos al empujar que al tirar, pues el pie móvil del puente es excitado en el primer caso y frenado en el segundo.

El timbre de los sonidos emitidos por una cuerda frotada varía notablemente con el punto en que el arco la excita; en condiciones normales el arco ataca las cuerdas a 2,5 cm. del puente, pero el punto de ataque puede hallarse entre 1/5 y 1/25 de la longitud útil de la cuerda; cuando la cuerda es atacada muy cerca del puente, produce un sonido de timbre nasal en el piano, agrio y metálico en el forte; si el ataque se realiza cerca del diapasón, el sonido es apagado y misterioso. Estos modos especiales de ataque deben indicarse con las palabras italianas "ponticello" y "sul tasto" respectivamente, pues de otro modo el ataque se realizará en el punto normal.

La intensidad del sonido depende de la amplitud de las vibraciones; ésta a su vez depende del número de crines que excitan la cuerda y de la velocidad del arco, que puede llegar hasta 2 m. por segundo. La presión del arco sobre las cuerdas aumenta la adherencia de las crines y por lo tanto la intensidad del sonido; ésta llega al máximo cuando la cuerda es excitada cerca del puente. La presión disminuye la frecuencia de los sonidos, pues frena un poco las vibraciones de las cuerdas: este efecto se compensa con el aumento de tensión que proviene de digitarlas.

75. LAS VIOLAS. VIOLA DE AMOR Y VIOLA "DA GAMBA". — Las violas constituyen una familia de instrumentos de cuerda frotada, utilizada en los siglos XVI y XVII, después de lo cual fué suplantada por la familia del violín ya estudiada. En la época de su apogeo, las violas se construían en tres tamaños principales: viola soprano, viola tenor y viola baja, según la frecuencia de los sonidos que emitían. La viola contrabajo, con seis cuerdas, es el antecesor directo del contrabajo moderno. La viola que se usa hoy en día, no pertenece a dicha familia, pues deriva del violín.

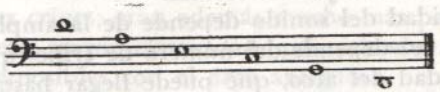
El timbre de la familia de las violas es suave y algo nasal; carecen del brillo y agilidad necesarios para actuar en concierto, adaptándose más a la música de cámara.

Sus principales diferencias con los violines son: la forma de la caja cerca del mango (véase la figura 35 que representa el contrabajo): el fondo de la caja, casi siempre plano; el número normal de cuerdas que es de seis, atacadas mediante un arco con la concavidad hacia las crines; el diapasón, provisto de pequeñas cejillas llamadas trastes, que marcan el lugar donde deben colocarse los dedos para obtener los diferentes sonidos, como existen en la guitarra; los oídos, que tienen forma de "C" en lugar de "F". La tensión de las cuerdas es menor y el puente poco curvo, facilita la ejecución de sonidos simultáneos, pero dificulta los pasajes rápidos.

Como puede verse, presentan con la familia de los violines diferencias numerosas; su postura de ejecución también es diferente, pues se sostienen entre o sobre las rodillas.

La *viola de amor* era una viola soprano a la cual se agregaban *cuerdas simpáticas de metal*, o sea cuerdas metálicas tendidas bajo el puente y afinadas al unísono con las cuerdas reales. Estas cuerdas simpáticas vibraban por resonancia, confiriendo al timbre del instrumento características muy especiales y su número era generalmente el doble de las reales, correspondiendo dos cuerdas simpáticas por cada cuerda real.

La *viola da gamba*, antecesora del violoncelo, para la cual escribió Juan Sebastián Bach tres bellísimas sonatas, poseía seis cuerdas afinadas:

Ej. 37 

76. INSTRUMENTOS DE CUERDA PUNTEADA. — La acción de "puntear" o como se dice frecuentemente, "pellizcar" una cuerda, consiste en apartarla con el dedo de su posición normal y dejarla en libertad para que la elasticidad la lleve a su posición inicial.

Los instrumentos cuyas cuerdas son excitadas de esta manera, se llaman instrumentos de cuerda punteada. Cuando la acción de puntear es repetida rápidamente por uno o varios dedos de la mano, lleva el nombre de "rasguear". El rasgueo puede efectuarse directamente o mediante un plectro, pequeña uña de asta, metal u otras substancias; los instrumentos ejecutados de este modo, se llaman instrumentos de cuerda rasgueada y constituyen una subclase de los instrumentos de cuerda punteada, siendo por lo tanto un error emplear indiferentemente ambos términos.

Estos instrumentos son difíciles de clasificar: en efecto, sus cajas son de formas variadísimas, pueden o no tener puente, el número de cuerdas es también variable, como también su constitución y afinación. Se los ejecuta además en posiciones muy diferentes. Los más importantes son: el arpa, la guitarra, la mandolina y el laúd. Pertenecen también a esta categoría, algunos instrumentos de teclado considerados equivocadamente como antecesores del piano: clave, virginal y espineta [1].

77. EL ARPA. — El arpa moderna, inventada por Sebastián Erard, consta de 47 cuerdas afinadas según la escala diatónica templada en DO b Mayor, desde DO b_1 hasta SOL b_7 y tendidas perpendicularmente a la caja armónica que recibe directamente sus vibraciones, no existiendo el puente que poseen otros instrumentos. La tapa de la caja armónica es plana y carece de oídos; éstos, de forma oblonga, se hallan sobre el fondo que es curvo. El arpa posee siete pedales que accionan un ingenioso mecanismo (figura 38), mediante el cual se acortan las

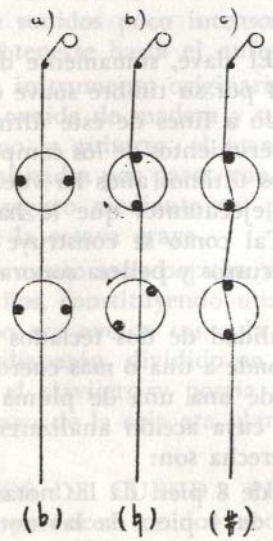


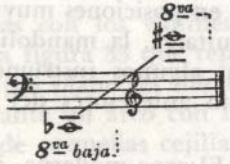
Fig. 38. — Mecanismo del arpa.

[1] El verdadero antecesor del piano es el clavicordio (párrafo 80).

cuerdas de modo que asciendan uno o dos semitonos. Cada pedal corresponde a una de las siete notas de la escala diatónica, accionando simultáneamente en toda la extensión del instrumento; por ejemplo, bajando una vez el pedal correspondiente al FA todos los FAb del instrumento se convertirán en FA natural. Es evidente que se producen de este modo numerosos sonidos homófonos que son aprovechados en la técnica del instrumento. Las dos cuerdas más graves no sufren la acción de los pedales y deben afinarse según las necesidades de la ejecución.

La extensión total de los sonidos que puede producir el arpa es DO b_1-SOL $\#_7$:

Ej. 39



Las cuerdas graves del arpa hasta el FAb_2, están entorchadas, y su grosor es bastante grande; desde el $SOLb_2$ en adelante las cuerdas son de tripa y su grosor y longitud decrece. Para facilitar la ejecución, se tiñen en rojo y azul respectivamente, las que corresponden a los sonidos DO y FA en toda la extensión del instrumento.

En la práctica orquestal suelen utilizarse los segundos armónicos de las cuerdas del arpa desde la cuerda del $SOLb_2$ hasta la el REb_5 aproximadamente.

78. EL CLAVE. — El clave, sumamente difundido y apreciado en los siglos XVII y XVIII por su timbre suave e íntimo y sus finezas de ejecución, fué desplazado a fines de este último por el piano, que se adaptaba más a los requerimientos de los compositores de aquellos tiempos. Sin embargo, en los últimos años ha vuelto a gozar de las simpatías de compositores y ejecutantes que le han devuelto parte de su importancia perdida. Tal como se construye actualmente, es un instrumento de grandes recursos y belleza sonora que merece plenamente nuestra atención.

Consta en la actualidad de dos teclados con una extensión FA_1-FA_6; cada tecla corresponde a una o más cuerdas que son excitadas por un martinete provisto de una uña de pluma o cuero. Tiene además siete pedales diferentes cuya acción analizaremos. Los pedales, numerados de izquierda a derecha son:

Pedal 1 — Registro de 8 pies: da las notas a su altura escrita.
„ 2 — Registro de 4 pies: da las notas a la octava superior.
„ 3 — Registro de 16 pies: da los sonidos a la octava inferior.
„ 4 — Acopla los teclados: ejecutando sobre el inferior acciona las teclas correspondientes al superior.

„ 5 — Sordina: acciona un paño que colocado sobre las cuerdas, disminuye la intensidad de los sonidos que produce.
„ 6 — Registro de 8 pies reforzado: las cuerdas son atacadas simultáneamente en dos puntos distintos, emitiendo sonidos más fuertes.
„ 7 — Registro de 8 pies atenuado: las cuerdas son pellizcadas cerca de sus extremos, produciendo sonidos extremadamente dulces.

Estos pedales pueden combinarse de muchas maneras, con lo cual se obtienen efectos variadísimos.

El virginal y la espineta eran instrumentos semejantes al clave. El virginal contenido en una caja oblonga sin patas, poseía cuerdas punteadas por picos de pluma. La espineta, inventada en el 1500, era un instrumento de forma y tamaño muy variados y sus cuerdas eran atacadas como en el virginal.

79. LA GUITARRA, LA MANDOLINA Y EL LAUD. — La *guitarra* es un instrumento de naturaleza esencialmente popular; su caja, cuyo fondo y tapa son planos y de espesor uniforme, posee un oído circular en el centro. Una barra de madera, situada sobre la tapa, actúa simultáneamente como cordal y como puente. Se construye habitualmente en madera. El diapasón está dividido por tonos o trastes, pequeñas cejillas que facilitan la ejecución.

Posee seis cuerdas, de tripa las tres primeras y de seda, entorchadas con hilo de cobre o de plata las más graves. Su afinación es: MI_4-SI_3-SOL_3-RE_3-LA_2-MI_2.

La guitarra produce sonidos poco intensos, de timbre dulce; sobre sus cuerdas puede obtenerse hasta el quinto parcial.

La *mandolina* es un instrumento originario de Italia meridional; posee una pequeña caja ovoide de madera y su tapa es plana con un oído circular central como la guitarra; el mango está dividido en tonos. Posee ocho cuerdas afinadas por pares, con la misma afinación del violín. Se ejecuta por rasgueo mediante un plectro. La mandola es una mandolina grande a la octava grave.

El *laúd* era un instrumento muy popular en el siglo XVII y se lo construía de varios tamaños, constituyendo una familia numerosa. La caja del instrumento tipo era ovoide como la de la mandolina, aunque bastante mayor. El diapasón, dividido en tonos, formaba un ángulo muy marcado con el clavijero y poseía un número de cuerdas elevado, a veces 19. La tapa de la caja era plana y poseía un oído circular como la guitarra.

80. INSTRUMENTOS DE CUERDA PERCUTIDA. — Los instrumentos de este grupo producen sonidos mediante cuerdas excitadas por percusión; ésta puede ser *directa* como en el cimbalón o *indirecta* como en el piano, donde los martillos percutores son controlados por un teclado.

La frecuencia del sonido emitido por una cuerda percutida depende de los factores considerados por las leyes de Mersenne, y de la velocidad con que rebota el martillo percutor después de la percusión. En efecto, *cuando el martillo que percute la cuerda rebota inmediatamente después de la percusión, la cuerda vibra con toda su longitud, produciendo el sonido que determinan las leyes de Mersenne para su longitud total; si el martillo rebota lentamente, la cuerda vibra dividida en dos secciones determinadas por el punto de percusión, pero sólo se escucha el sonido correspondiente a la de menor longitud, que absorbe la mayor parte de la energía sonora.*

La intensidad del sonido emitido por una cuerda percutida depende directamente de la fuerza con que se realiza la percusión; depende además del punto de percusión, pues si éste está situado muy cerca de los extremos de la cuerda, la intensidad de los sonidos obtenidos es menor. Las cuerdas sometidas a gran tensión permiten obtener sonidos más intensos que los que producen las cuerdas poco tensas.

El timbre de los sonidos emitidos por una cuerda percutida depende indirectamente de los mismos factores que modifican la intensidad. En efecto, el punto donde es percutida la cuerda determina, conforme a la ley de Young (párrafo 68), los armónicos que estarán ausentes del espectro armónico, y la fuerza de la percusión controla la cantidad de parciales transitorios que formarán el timbre. Estos parciales transitorios, provenientes de vibraciones aperiódicas que se extinguen en fracciones de segundo, modifican sin embargo considerablemente el timbre. Influye también sobre el timbre la substancia que forma la cuerda.

A continuación trataremos del cimbalón y el clavicordio, instrumentos de escasa importancia, pero que estudiaremos, uno por el método especial con que es ejecutado, y el otro en su calidad de antecesor directo del piano.

El *cimbalón* es un instrumento utilizado por las orquestas cíngaras. Posee una escala cromática completa desde MI_2 hasta MI_6. Sus cuerdas son percutidas directamente por el ejecutante que en cada mano tiene una pequeña bagueta provista de una cabeza de madera. El timbre de este instrumento es algo agrio, pero en manos de un buen ejecutante permite obtener efectos sorprendentes.

El *clavicordio,* antecesor directo del piano, era un instrumento de carácter íntimo debido a que sus cuerdas sometidas a tensiones pequeñas, producían sonidos débiles aunque delicados y expresivos; las cuerdas no eran percutidas por martillos como en el piano sino por tangentes metálicas que permanecían en contacto con ellas hasta que el ejecutante abandonaba la tecla, produciendo por lo tanto un nodo en el punto de contacto en lugar del vientre que producen los martillos del piano que se retiran inmediatamente después de la percusión.

81. EL PIANO. — El piano es el más importante de los instrumentos de cuerda percutida por sus grandes posibilidades musicales y su valiosa literatura. A continuación estudiaremos un piano de concierto,

por ser este tipo de instrumento el más perfecto de los varios existentes; no describiremos su aspecto exterior por ser sumamente conocido.

Las partes esenciales de una piano son: a) la *caja* (figura 40a), compuesta por un *marco* resistente sobre el cual se tienden horizontalmente las cuerdas y por la *tabla armónica,* destinada a reforzar la intensidad de los sonidos que aquéllas producen; b) el *mecanismo percutor* (fig. 40b), que se compone de una serie de martillos accionados por un teclado mediante un sistema de palancas.

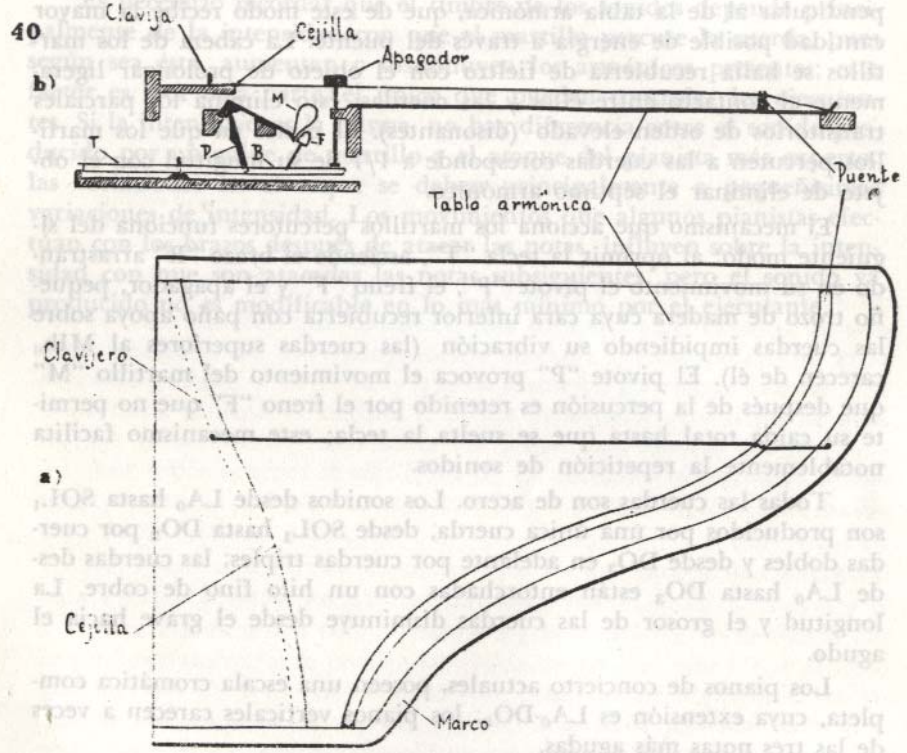


Fig. 40. — Piano: a) corte transversal
b) corte longitudinal.

El marco consiste en una o varias piezas de bronce o acero de gran solidez, pues deben resistir la considerable tensión ejercida por las cuerdas que alcanza a siete toneladas.

La tabla armónica es una plancha de madera de abeto formada por varias planchuelas encoladas entre sí; se halla debajo de las cuerdas en un plano paralelo al que ellas determinan.

El lado del marco más próximo al teclado sirve de clavijero: en él se insertan las clavijas que permiten variar la tensión de las cuerdas para su afinación. El extremo fijo de éstas, se enrosca sobre sendos to-

pes que se hallan sobre el extremo opuesto. La longitud vibrante de las cuerdas es determinada por una cejilla y por un puente, ambos comunes a todas ellas. La cejilla es solidaria con el marco y se halla próxima al clavijero.

El puente es una barra de madera encolada sobre la tabla armónica, a la cual comunica las vibraciones de las cuerdas.

Los martillos se hallan debajo de las cuerdas (fig. 40b), pues ésto aumenta la velocidad del movimiento de rebote que realizan después de la percusión y se logra que aquellas vibren dentro de un plano perpendicular al de la tabla armónica, que de este modo recibe la mayor cantidad posible de energía a través del puente. La cabeza de los martillos se halla recubierta de fieltro con el objeto de prolongar ligeramente el contacto entre ellos y las cuerdas; ésto elimina los parciales transitorios de orden elevado (disonantes). El punto en que los martillos percuten a las cuerdas coresponde a 1/7 de su longitud con el objeto de eliminar el séptimo armónico.

El mecanismo que acciona los martillos percutores funciona del siguiente modo: al oprimir la tecla "T", asciende el brazo "B" arrastrando en su movimiento el pivote "P", el freno "F" y el apagador, pequeño trozo de madera cuya cara inferior recubierta con paño apoya sobre las cuerdas impidiendo su vibración (las cuerdas superiores al MIb_6 carecen de él). El pivote "P" provoca el movimiento del martillo "M" que después de la percusión es retenido por el freno "F" que no permite su caída total hasta que se suelta la tecla; este mecanismo facilita notablemente la repetición de sonidos.

Todas las cuerdas son de acero. Los sonidos desde LA_0 hasta SOL_1 son producidos por una única cuerda, desde SOL_1 hasta DO_3 por cuerdas dobles y desde DO_3 en adelante por cuerdas triples; las cuerdas desde LA_0 hasta DO_3 están entorchadas con un hilo fino de cobre. La longitud y el grosor de las cuerdas disminuye desde el grave hacia el agudo.

Los pianos de concierto actuales, poseen una escala cromática completa, cuya extensión es LA_0-DO_8; los pianos verticales carecen a veces de las tres notas más agudas.

El piano posee siempre dos pedales que aumentan sus recursos expresivos. El pedal derecho levanta simultáneamente todos los apagadores, creando una atmósfera sonora inimitable sobre cualquier otro instrumento. El pedal izquierdo corre lateralmente los martillos de manera que percutan las cuerdas simples con menos fuerza y las dobles y triples como simples y dobles respectivamente; se obtienen así sonidos más débiles. Algunos pianos poseen un tercer pedal situado entre los anteriores, llamado *pedal tonal* que conserva levantados los apagadores de las cuerdas correspondientes a las teclas que se hallan bajas en el momento que se pone el pedal. Este pedal, cuyo uso desconocen por desgracia muchos pianistas, permite obtener sobre el piano interesantísimos efectos orquestales. En los pianos verticales no existe nunca

el pedal tonal, existiendo en cambio un pedal de sordina; ésta consiste simplemente en un paño grueso que se interpone entre las cuerdas y los martillos, disminuyendo marcadamente la intensidad del sonido.

El timbre del piano, aunque muy homogéneo, no es igual en todos sus registros. Los sonidos graves poseen un espectro rico en armónicos superiores, mientras que los del registro medio y agudo poseen pocos armónicos. Debido a la existencia de armónicos transitorios el timbre del piano cambia constantemente; pueden haber cambios notables, mismo en 1/200 de segundo.

Es necesario recordar que el timbre de los sonidos depende principalmente de la intensidad con que el martillo percute la cuerda, pues según sea ésta, aumentan o disminuyen los armónicos presentes; este factor es, por otra parte, el único que pueden controlar los ejecutantes. Si la intensidad es la misma, no hay diferencia entre el sonido producido por un golpe de martillo y el ataque del pianista más experto; las variaciones en el toque se deben principalmente a pequeñísimas variaciones de intensidad. Los movimientos que algunos pianistas efectúan con los brazos después de atacar las notas, influyen sobre la intensidad con que son atacadas las notas subsiguientes, pero el sonido ya producido no es modificable en lo más mínimo por el ejecutante.

CAPITULO XI

Tubos sonoros: su clasificación. — Vibraciones de la columna de aire contenida en un tubo. — Sonidos que puede producir un tubo abierto. — Sonidos que puede producir un tubo cerrado. — Leyes que rigen las vibraciones de los tubos. — Correcciones de longitud en los tubos sonoros. — Longitud de los tubos correspondientes a los diversos "DO" empleados en música. — Lengüetas y boquillas: diversos tipos. — Tubos de embocadura. — Tubos de lengüeta. — Tubos de boquilla.

82. TUBOS SONOROS: SU CLASIFICACION. — Se llaman *tubos sonoros* aquellos que contienen una columna gaseosa capaz de producir sonido al ser convenientemente excitada. *El cuerpo sonoro es la columna gaseosa, y no el tubo que la contiene;* en efecto, éste tiene la importante función de definir la forma de aquélla pero fuera de ésto, influye relativamente poco sobre los fenómenos sonoros.

Los tubos sonoros se clasifican de varias maneras: según el número de aberturas que poseen, según su forma y según el modo de excitación de la columna aérea.

En acústica, se llaman *tubos cerrados* los que poseen una sola abertura y *tubos abiertos* los que poseen dos o más [1].

Para clasificar los tubos sonoros según su forma, es necesario observar previamente que pueden ser doblados sin que ésto afecte el comportamiento de la columna aérea que contienen, siempre que los radios de curvatura de las curvas que describan sean grandes con respecto al radio de su sección normal [2] en los puntos que describen la curva; por otra parte, haciendo caso omiso de las distintas curvas descritas por el tubo, debe observarse que la forma exterior del mismo puede no corresponder a la interior, siendo ésta la que interesa pues es la que define la forma de la columna aérea. Hechas estas consideraciones diremos que los tubos sonoros se clasifican según su forma interior (previamente rectificados), en tres tipos básicos: *cónicos, cilíndricos* y *prismáticos*. Los tubos prismáticos se utilizan solamente en ciertos regis-

[1] Los tubos cerrados, en el sentido habitual de la palabra, no pueden actuar como tubos sonoros.

[2] Hablamos del "radio" de la sección normal de un tubo sonoro porque en los tubos que se doblan, ésta es casi siempre circular.

tros de órgano y en algunos instrumentos primitivos; los demás instrumentos poseen tubos cilíndricos, cónicos o de tipos intermedios. El cono de los tubos cónicos es en realidad un cono truncado.

Según el modo de excitación de la columna aérea que contienen, los tubos sonoros se clasifican en: *tubos de embocadura, tubos de lengüeta* y *tubos de boquilla* [3]; esta clasificación no es muy lógica pues la boquilla desempeña un papel accesorio en la excitación, pudiéndose clasificar a estos últimos como instrumentos de lengüeta labial o membranácea (véanse los párrafos 89 y 92).

83. VIBRACIONES DE LA COLUMNA DE AIRE CONTENIDA EN UN TUBO SONORO. — Las columnas de aire contenidas en los tubos sonoros se comportan, desde ciertos puntos de vista, como cuerdas musicales. En efecto, en ambos casos la vibración es debida a la formación de una onda estacionaria; por lo tanto, las columnas de aire vibrante poseen *nodos,* o sea puntos donde la vibración es nula, y *vientres,* equidistantes de los anteriores, donde la vibración alcanza su máxima amplitud; la distancia entre dos nodos o dos vientres consecutivos será siempre media longitud de onda.

La vibración de las columnas de aire es longitudinal; los nodos serán, por lo tanto, puntos de condensación y los vientres puntos de rarefacción; en los extremos cerrados siempre se producen nodos y en los extremos abiertos generalmente se producen vientres. El punto de excitación no puede ser un nodo, pero no necesita ser un vientre, pudiendo estar en un punto intermedio. No es necesario que las aberturas de un tubo coincidan con los extremos, pudiendo éstos estar cerrados y haber una o más aberturas en otras partes del tubo.

Una columna de aire puede vibrar con toda su longitud o dividida en segmentos iguales lo mismo que las cuerdas; en el primer caso se obtiene el sonido llamado fundamental, y en los otros los armónicos: segundo, si la columna vibra dividida en mitades; tercero, si vibra en tercios, etc.

La vibración del aire contenido en un tubo puede representarse indicando las condensaciones y rarefacciones del aire con puntos o líneas que corresponden a las moléculas de aire, mediante la porción de sinusoide correspondiente al estado vibratorio que se quiere representar, o representando dentro del tubo las ondas componentes de la parte de onda estacionaria que contiene. Las figuras 41a y 42a representan respectivamente un tubo abierto y un tubo cerrado produciendo su fundamental; la representación ha sido efectuada mediante la onda estacionaria.

84. SONIDOS QUE PUEDE PRODUCIR UN TUBO ABIERTO. — Conforme a lo estudiado sobre las vibraciones de una columna aérea contenida en un tubo sonoro, sabemos que en los extremos de

[3] Existen autores que utilizan indiferentemente los términos "embocadura" y "boquilla"; más adelante precisaremos el significado que atribuímos a cada uno de estos términos.

un tubo abierto sólo pueden haber vientres de vibración; por lo tanto, el tubo producirá su fundamental cuando vibre con un nodo único en su centro. Observando la figura 41a, puede verse que si "L" es la lon-

41

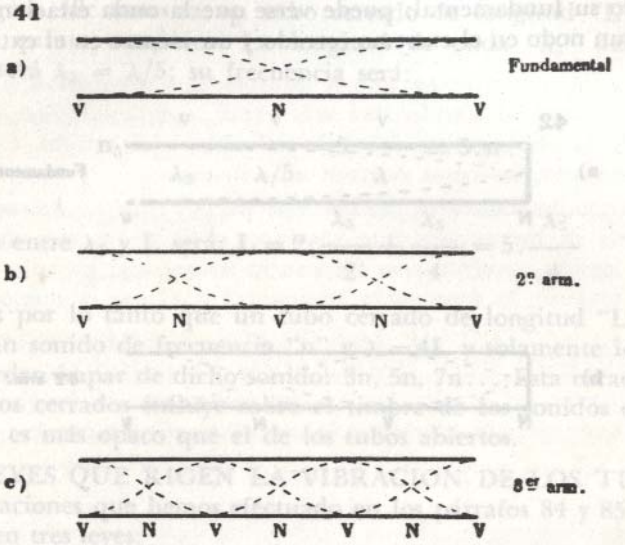


Fig. 41. — Vibraciones de un tubo abierto.

gitud del tubo, podemos escribir: $\lambda = 2.L$ ("λ" es la longitud de onda de la fundamental). Como $n = \frac{v}{\lambda}$ ("n" es la frecuencia de la fundamental y "v" la velocidad del sonido), podemos escribir:

$$n = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2.L};$$

Cuando el tubo produce su segundo armónico (fig. 41b), la longitud de onda "λ_2" de dicho sonido será: $\lambda_2 = \lambda/2$

su frecuencia "n_2" será: $n_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{\lambda/2} = 2.\frac{v}{\lambda} = 2.n$

Cuando el tubo produzca su tercer armónico (fig. 41c), la longitud de onda "λ_3" será $\lambda/3$ y su frecuencia "n_3" será: $n_3 = 3.n$

Vemos por lo tanto que teóricamente un tubo abierto de longitud L puede producir un sonido de frecuencia $n = \frac{v}{2.L}$ y todos los armónicos de dicho sonido (2n, 3n, 4n...).

Los tubos abiertos pueden, en ciertas condiciones, comportarse como tubos cerrados (véase el párrafo 97).

85. SONIDOS QUE PUEDE PRODUCIR UN TUBO CERRADO. — Observemos la figura 42a que representa un tubo cerrado produciendo su fundamental; puede verse que la onda estacionaria se forma con un nodo en el extremo cerrado y un vientre en el extremo abier-

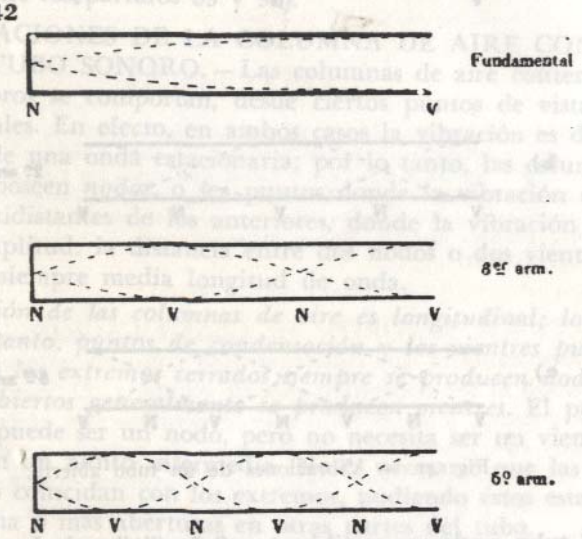


Fig. 42. — Vibraciones de un tubo cerrado.

to pues éste es el único modo de vibración posible a esta clase de tubos. En las condiciones de la figura, es evidente que $\lambda = 4.L$; por lo tanto, la frecuencia "n" de la fundamental será: $n = \frac{v}{4.L}$

Veamos ahora lo que ocurre cuando la columna de aire contenida en un tubo cerrado vibra subdividida. Recuérdese que en el extremo cerrado debe haber un nodo y en el extremo abierto un vientre. Puede verse inmediatamente que sólo los armónicos de orden impar producirán esta disposición, pues cualquier armónico par produciría otro nodo en el extremo abierto y esto es inadmisible si allí se encuentra el punto de excitación.

Luego de la fundamental, se produce en primer lugar el tercer armónico; su longitud de onda "λ_3" será: $\lambda_3 = \lambda/3$; su frecuencia "n_3" será: $n_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\lambda/3} = 3.\frac{v}{\lambda} = 3.n$

Observando la figura 42b, que muestra un tubo cerrado produciendo su tercer armónico puede verse que: $L = \frac{\lambda_3}{2} + \frac{\lambda_3}{4} = \frac{3\lambda_3}{4}$.

La figura 42c muestra un tubo cerrado de longitud "L" produciendo su quinto armónico. La longitud de onda "λ_5" del quinto armónico será $\lambda_5 = \lambda/5$; su frecuencia será:

$$n_5 = \frac{v}{\lambda_5} = \frac{v}{\lambda/5} = 5.\frac{v}{\lambda} = 5.n$$

la relación entre λ_5 y L será: $L = 2.\frac{\lambda_5}{2} + \frac{\lambda_5}{4} = 5.\frac{\lambda_5}{4}$

Vemos por lo tanto que un tubo cerrado de longitud "L" puede producir un sonido de frecuencia "n" y $\lambda = 4L$ y solamente los armónicos de orden impar de dicho sonido: 3n, 5n, 7n... Esta característica de los tubos cerrados influye sobre el timbre de los sonidos que producen que es más opaco que el de los tubos abiertos.

86. LEYES QUE RIGEN LA VIBRACION DE LOS TUBOS. — Las observaciones que hemos efectuado en los párrafos 84 y 85 pueden resumirse en tres leyes:

1ª LEY. — *La frecuencia corespondiente al sonido fundamental que puede producir un tubo, varía inversamente a la longitud del mismo:* $n_1/n_2 = L_2/L_1$; por lo tanto un tubo cuya longitud es la mitad o el doble que la de otro, producirá su octava aguda o grave respectivamente.

2ª LEY. — *El sonido fundamental emitido por un tubo cerrado n_c es la octava grave del sonido fundamental emitido por un tubo abierto n_a de la misma longitud.* Si "L" es la longitud de ambos tubos, sabemos por el párrafo 85 que para la fundamental en el tubo cerrado tendremos $\lambda_c = 4L$; mientras que para la fundamental en el tubo abierto tendremos: $\lambda_a = 2L$ o sea que $\lambda_c = 2.\lambda_a$; como $n_c/n_a = \lambda_a/\lambda_c$ tendremos: $n_c = n_a/2$.

3ª LEY. — *Los tubos abiertos emiten la serie completa de los armónicos correspondientes a su longitud; los tubos cerrados emiten sólo los armónicos de orden impar.*

Las dos primeras leyes se llaman leyes de las longitudes y la tercera, ley de los armónicos.

87. CORRECCIONES DE LONGITUD EN LOS TUBOS SONOROS. — Las relaciones que dimos anteriormente entre frecuencia y longitud de un tubo, son teóricas; *en la práctica, la longitud de tubo necesaria para producir un sonido de frecuencia "n", es siempre algo menor que la teórica, debido a que los vientres se forman afuera del tubo*

y no exactamente en los extremos del mismo [1]. La distancia (desde el extremo del tubo) a la cual se forma el vientre, depende de la sección del mismo.

Las variaciones de temperatura influyen sobre la frecuencia de los sonidos que emite un tubo sonoro; en efecto, cuando aumenta la temperatura, aumenta la velocidad del sonido (párrafo 13) y por lo tanto la frecuencia de los sonidos que éste emite. Por otra parte, el aumento de temperatura afecta también sus dimensiones; al aumentar su longitud el sonido será más grave, compensándose en parte el efecto de la temperatura sobre la velocidad del sonido. Cuando baja la temperatura, las cosas ocurren a la inversa.

Si un tubo sonoro es llenado con un gas distinto del aire, varía la frecuencia de los sonidos que produce; si el gas es más denso que el aire los sonidos tendrán una frecuencia menor que los que se obtenían primitivamente; la frecuencia aumentará si el gas es menos denso.

88. LONGITUD DE LOS TUBOS CORRESPONDIENTES A LOS DIVERSOS "DO" EMPLEADOS EN MUSICA. — Los diversos DO utilizados en música suelen designarse con la longitud de tubo abierto que aproximadamente los produce. Corresponde:

al DO_0 el DO de 32 pies;
al DO_1 el DO de 16 pies;
al DO_2 el DO de 8 pies;

y así sucesivamente: 4, 2 y 1 pies, etc.

El DO_2 de 8 pies se considera en ciertos instrumentos como punto de referencia para los demás sonidos. En los distintos registros del órgano y del clave (párrafo 78 y 104), se llaman registros de 8 pies aquellos cuyos sonidos se escriben a la altura real; si se escriben una o dos octavas más arriba, se dice que son registros de 16 y 32 pies respectivamente y si se escriben a la octava o doble octava inferior, los registros serán de 4 o 2 pies.

Para determinar si un registro es de 16, 8, 4 pies, etc., se toma como altura general del registro la longitud de tubo abierto correspondiente al DO más grave que puede producir.

89. LENGÜETAS Y BOQUILLAS: DIVERSOS TIPOS. — Las *lengüetas* son pequeñas laminillas elásticas, generalmente de metal o de madera que, sujetas a un soporte de manera conveniente, vibran al paso de una corriente aérea, produciendo sonido; se las clasifica se-

[1] Para un tubo cerrado de forma cilíndrica (excitado por su extremo abierto), la corrección será $L' = L + 2{,}7.R$, donde "L'" será la longitud vibrante de la columna de aire, "L" la longitud real del tubo y "R" el radio de su sección circular.

Para un tubo cilíndrico abierto, excitado en un extremo, la corrección en el extremo libre será pequeña (0,6) y se sumará a la del extremo donde se realiza la excitación; tendremos entonces: $L' = L + 3{,}3 . R$.

Estas correcciones han sido calculadas para tubos cuyo diámetro (2R) es pequeño respecto de la longitud de onda de los sonidos que producen; varían un poco con la frecuencia de los sonidos considerados.

gún su mayor o menor libertad de movimiento en dos tipos diferentes: libres y batientes [1].

Se llaman *lengüetas libres* aquellas que vibran libremente a uno y otro lado del plano que determinan cuando están en reposo; ésto se obtiene con un soporte cuyos únicos puntos de contacto con la lengüeta son aquellos en que ésta se halla fijada a aquel. Lo figura 43 representa esquemáticamente una lengüeta libre. Las lengüetas libres son siempre de metal; se utilizan en el armonio, el acordeón, la armónica y otros aerófonos libres.

Fig. 43. — Lengüeta libre.

Fig. 44. — Lengüeta batiente.

Se llaman *lengüetas batientes* aquellas que baten contra el soporte al cual están sujetas. La figura 44 representa esquemáticamente una lengüeta batiente; comparando esta figura con la figura anterior, es fácil ver que las vibraciones de la lengüeta batiente se hallan restringidas por la presencia del soporte, cosa que no ocurre con las lengüetas libres.

Las lengüetas batientes se dividen a su vez en simples y dobles, según el tipo de soporte que utilizan. Las *lengüetas batientes simples,* llamadas corrientemente lengüetas simples, son aquellas que se colocan sobre los bordes de una abertura contra los cuales baten. Las *lengüetas batientes dobles,* llamadas corrientemente lengüetas dobles, son aquellas que utilizan como soporte otra lengüeta contra la cual baten, batiendo ésta a su vez contra la primera.

Las lengüetas batientes simples son utilizadas por los clarinetes y los saxófonos y por los juegos de lengüeta del órgano, siendo de metal en este instrumento y de madera en los primeros. Puede verse en la figura 45 una lengüeta batiente simple tal como se la utiliza en el clarinete y el saxófono.

Las lengüetas batientes dobles se construyen siempre de madera; son utilizadas por los oboes, fagotes y sarrusófonos; también utilizan lengüetas dobles algunos instrumentos de poca importancia como la gaita [2]. La figura 46 representa una lengüeta doble de oboe.

Se llama *boquilla* de un instrumento de viento la porción de tubo que se modifica con el objeto de ser adosada o introducida entre los labios del ejecutante. Muchos instrumentos de viento utilizan boquillas; en los instrumentos de lengüeta simple, ésta se sujeta sobre

[1] De un modo más general, puede llamarse lengüeta cualquier aparato cuya vibración es entretenida por una corriente gaseosa en la cual determina a su vez un flujo periódico.

[2] La gaita presenta la particularidad de utilizar simultáneamente lengüetas simples y lengüetas dobles.

la boquilla; en los instrumentos de embocadura indirecta, la parte superior del portaviento está transformada en una boquilla (véanse el párrafo 95 y la figura 46). En ambos tipos de instrumentos, la boquilla es introducida entre los labios del ejecutante.

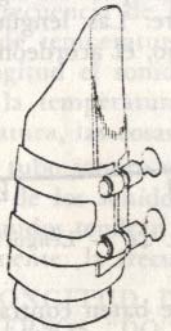


Fig. 45. — Lengüeta de clarinete.

Fig. 46. — Lengüeta de oboe.

En los instrumentos llamados de boquilla (trompas, trompetas, trombones y tuba), la forma de la boquilla es muy diferente a la de las boquillas de los instrumentos de lengüeta y de embocadura, pues se la construye con el objeto de ser adosada a los labios del ejecutante en lugar de ser introducida entre ellos (ver lámina II). En este tipo de instrumentos los labios del ejecutante actúan del mismo modo que una lengüeta batiente doble, por lo cual se dice que forman una *lengüeta doble membranácea*. Las cuerdas vocales contenidas en la laringe, parte esencial del órgano de fonación del hombre, actúan también como lengüetas membranáceas.

Las lengüetas tienen su propia frecuencia; al ser asociadas a un tubo sonoro puede o no predominar la influencia de la columna aérea sobre la de la lengüeta para determinar la frecuencia de los sonidos que producen. En el primer caso están los aerófonos de columna (instrumentos de viento de la orquesta), y en el segundo algunos aerófonos libres como los tubos de lengüeta del órgano.

La frecuencia de los sonidos que produce una lengüeta batiente aislada, varía enormemente con la presión del aire que la excita; ésto se observa fácilmente soplando a través de una lengüeta de oboe sin asociarla al tubo del instrumento. En cambio, *la frecuencia de los sonidos que producen las lengüetas libres no depende de la presión del aire que las excita,* variando sólo su intensidad.

90. TUBOS DE EMBOCADURA. — Los *tubos de embocadura* son tubos sonoros que poseen una abertura convenientemente dispuesta llamada *embocadura*, uno de cuyos bordes es biselado. Contra este borde incide una corriente de aire que se divide en dos ramas; la rama

que penetra en el tubo origina pequeñas vibraciones que a su vez excitan por resonancia la columna aérea conteñida en el tubo.

El prototipo de los instrumentos de embocadura es la flauta, nombre que por extensión designa a menudo a todos estos tubos.

Los tubos de embocadura pueden dividirse en dos clases: tubos de embocadura directa y tubos de embocadura indirecta. los *tubos de embocadura directa* son aquellos en que la corriente de aire es dirigida sobre la embocadura, directamente por los labios del ejecutante. La figura 47 muestra una embocadura de flauta traversera que es el prototipo de los instrumentos de embocadura directa.

Fig. 47. — Embocadura de flauta traversera.

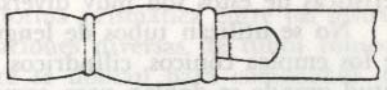


Fig. 48. — Embocadura de flauta de pico.

Los *tubos de embocadura indirecta* son aquellos donde la corriente de aire, producida mecánicamente o por el ejecutante, pasa por un tubo llamado *portaviento* antes de incidir sobre el bisel de la embocadura. La figura 48 representa la parte superior de una flauta de pico; obsérvese el portaviento, conformado para servir de boquilla. Algunos tubos de órgano como el que representa la figura 49, son tubos de embocadura indirecta.

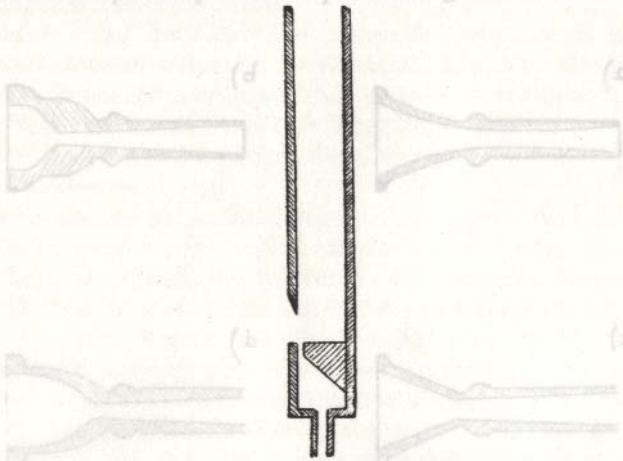


Fig. 49. — Tubo de embocadura indirecta (órgano).

La forma de los tubos de embocadura es muy variada: los hay cónicos, cilíndricos, prismáticos y de tipos intermedios. Se construyen

siempre rectos, aunque no hay ningún inconveniente teórico que impida doblarlos. Pueden ser abiertos o cerrados.

91. TUBOS DE LENGÜETA. — Los *tubos de lengüeta* son aquellos en que la columna de aire es excitada por una lengüeta, sea cual fuere el tipo de ésta.

Todos los instrumentos de lengüeta que hay en la orquesta utilizan lengüetas batientes: simples los clarinetes y saxófonos, y dobles los oboes, fagotes y sarrusófonos. En los registros de lengüeta del órgano se utilizan lengüetas batientes simples.

El timbre de los instrumentos de lengüeta es rico en armónicos; por otra parte, varía mucho de un instrumento a otro, pues las características de éstos son muy diversas.

No se utilizan tubos de lengüeta de forma prismática; en cambio se los emplea cónicos, cilíndricos y de formas intermedias. Los de longitud grande se doblan para comodidad de los ejecutantes.

El comportamiento de estos tubos varía con la lengüeta empleada para excitarlos.

92. TUBOS DE BOQUILLA. — Los tubos de este grupo se caracterizan por su boquilla que se adosa a los labios del ejecutante; éstos, como vimos ya, forman una lengüeta membranácea. La forma interior de una boquilla afecta notablemente el timbre de los sonidos que produce el tubo al cual se acopla, sin perjuicio de la influencia ejercida por la forma interior del tubo mismo. Las figuras 50a, 50b, 50c y 50d (lámina II), representan respectivamente cortes longitudinales de una boquilla de trompa, de trompeta, de trombón y de tuba; puede decirse en líneas generales que las boquillas profundas como la

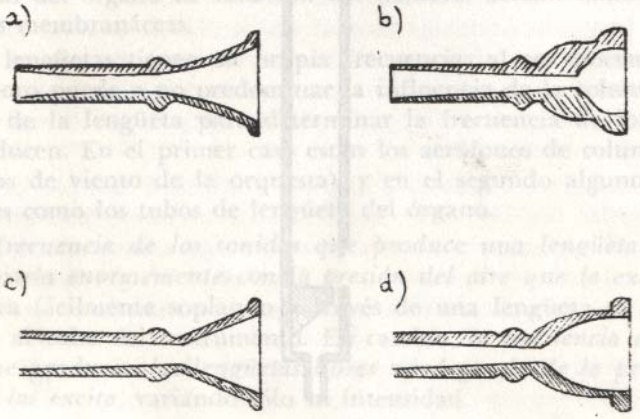


Fig. 50. — Corte longitudinal de una boquilla:
a) de trompa;
b) de trompeta;
c) de trombón;
d) de tuba.

de trompa producen sonidos dulces y oscuros, siendo en cambio claros y estridentes los que producen las de forma semiesférica y escasa profundidad.

Se llama *grano* de una boquilla, el punto donde su sección transversal es menor; si ésta es grande, la boquilla será de grano grueso, y de grano fino en el caso contrario.

El extremo inferior de los tubos de boquilla se ensancha marcadamente formando la *campana;* ésta influye sobre el timbre de los sonidos que produce el instrumento, orientándolos, reduciendo la intensidad de los armónicos superiores y favoreciendo la producción de ondas esféricas [1].

No existen tubos de boquilla de forma prismática entre los instrumentos utilizados; son todos combinaciones diversas de tubos cónicos y cilíndricos. Estos tubos casi siempre se doblan para comodidad de los instrumentistas.

[1] Los tubos de lengüeta poseen también campana, aunque generalmente de dimensiones menores.

CAPITULO XII

Instrumentos de viento. — Obtención de la escala sobre los diferentes instrumentos. — La flauta. — El oboe. — El clarinete. — Los saxófonos. — El fagot. Los sarrusófonos. — La trompa. — La trompeta. — El trombón. — Saxhornos y saxotrombas. La tuba. — El órgano. — El armonio. — La voz humana: vocales y consonantes. — El vibrato vocal e instrumental.

93. INSTRUMENTOS DE VIENTO. — Los instrumentos de viento utilizados corrientemente, suelen clasificarse en dos grupos: instrumentos de madera, grupo que comprende las familias de la flauta, el oboe, el clarinete, el saxófono y el fagot, e instrumentos de metal, grupo que comprende las trompas, las trompetas, los trombones y los saxhornos. Esta clasificación como dijimos ya, es defectuosa, pues las flautas se construyen muy a menudo de plata y los saxófonos se construyen invariablemente de metal.

La flauta y sus derivados son tubos de embocadura directa; las maderas restantes son tubos de lengüeta: de lengüeta simple el clarinete y el saxófono, de lengüeta doble el oboe y el fagot. Los instrumentos de metal son todos tubos de boquilla.

En el órgano, como veremos luego, es necesario estudiar cada registro separadamente.

La frecuencia de los sonidos que produce un instrumento de viento, depende en primer lugar de la longitud de columna aérea que los produce; las otras dimensiones influyen sin embargo bastante, como vimos al estudiar las correcciones a la longitud (párrafo 87). La temperatura del aire vibrante influye también sobre la frecuencia, aumentando ésta cuando aumenta la temperatura. El límite inferior de la extensión de un instrumento, depende de la longitud del tubo y en algunos casos de la habilidad del ejecutante; ésta influye marcadamente sobre el límite superior, debido a la dificultad que presenta la obtención de los parciales de orden elevado que forman el registro agudo de cada instrumento.

La intensidad de los sonidos que produce un instrumento de viento, depende de la fuerza con que es excitada su columna de aire por el soplo.

El timbre, depende en primer lugar del modo de excitación del instrumento. Los tubos de embocadura producen sonidos suaves y dulces, relativamente desprovistos de armónicos; los tubos de lengüeta, sonidos de timbre penetrante y algo nasal, especialmente los de lengüeta doble, ricos en armónicos; los tubos de boquilla producen sonidos de timbre redondo y brillante, ricos también en armónicos. Influye muchísimo sobre el timbre que el tubo sea abierto o cerrado; los tubos cerrados poseen un timbre opaco y generalmente más oscuro que los abiertos, pues faltan los armónicos pares, notándose especialmente la falta del segundo.

Es costumbre decir que el timbre de los sonidos que produce un tubo sonoro, no depende de la materia que forma el tubo; esto es inexacto, pues la materia ejerce una cierta influencia, aunque no muy bien aclarada. La teoría más aceptada es aquella que toma en cuenta el formante del instrumento; la materia del tubo no afectaría las vibraciones de la columna aérea, pero como cada cuerpo tiene su frecuencia propia (párrafo 24), la resonancia entre la columna de aire y el tubo mismo variaría según la naturaleza de éste.

Las dimensiones de los tubos influyen sobre la capacidad que poseen para producir parciales; puede decirse en líneas generales que los tubos de sección pequeña con relación a su longitud tienden a producir parciales de orden elevado y los de sección grande tienden a producir la fundamental y los parciales de orden bajo.

Los parciales que producen las columnas aéreas de los instrumentos de viento son generalmente desafinados; los ejecutantes corrigen la entonación variando la tensión de los labios y la fuerza del soplo.

94. OBTENCION DE LA ESCALA SOBRE LOS DIFERENTES INSTRUMENTOS. — Si se ordenaran según su frecuencia los parciales que pueden obtenerse con un tubo sonoro, la escala sería, en el mejor de los casos, igual a la serie de armónicos de la fundamental del tubo; es evidente que los recursos musicales de un instrumento de esta clase, cuya escala estuviera formada por los parciales de una sola columna aérea, serían muy reducidos. Ahora bien, con la excepción del órgano que posee un tubo sonoro para cada sonido y del armonio que no posee ninguno, los instrumentos de viento que estudiaremos poseen un tubo sonoro único, debiendo recurrirse por esta razón a diversos artificios para variar la longitud de la columna aérea que contienen, y obtener así un número suficiente de columnas aéreas para formar su escala con las fundamentales y los parciales de dichas columnas reducidos a la escala templada.

Los procedimientos seguidos para obtener columnas aéreas de diferente longitud sobre un mismo tubo sonoro pueden reducirse a dos: perforar sobre sus paredes orificios de tamaño y posición convenientes que permitan *variar la longitud acústica* del tubo, determinando la longitud de la columna aérea en el momento en que se destapa un orificio dado; *variar su longitud real* mediante porciones de tubo que se

conectan al tubo principal obteniéndose así las columnas aéreas deseadas.

Los orificios que varían la longitud acústica de un tubo sonoro se controlan mediante los dedos o mediante *llaves;* éstas son palancas o sistemas de palancas que permiten controlar aquellos orificios cuyo diámetro excede el ancho de la yema de los dedos o cuya situación sobre el tubo no permite un control directo. La figura 51 representa una llave cualquiera; la almohadilla destinada a cubrir el orificio controlado por la llave, que se halla sobre la cara interna de ésta, se llama "zapatilla".

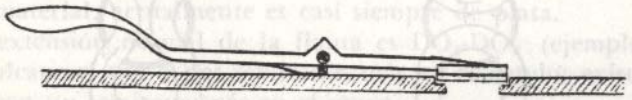


Fig. 51. — Llave.

No es indiferente el diámetro de los orificios que se perforan sobre un tubo sonoro; para una misma longitud acústica, un orificio de diámetro grande producirá un sonido de frecuencia algo mayor que uno de diámetro más pequeño. Este hecho se utiliza para corregir la entonación de instrumentos defectuosos y para facilitar en algunos casos su digitación. En ciertos instrumentos como el fagot, los orificios exteriores no indican la posición real del orificio sobre la pared interna del intrumento, pues se perforan oblicuamente para agruparlos mejor bajo el control de la mano.

Los instrumentos que utilizan tubos de embocadura y de lengüeta, forman su escala variando la longitud acústica de sus tubos; cada columna aérea produce su fundamental y un corto número de parciales que se obtienen variando la fuerza del soplo y la tensión de los labios; en los tubos de lengüeta, la obtención de parciales se facilita mediante un portavoz, pequeño orificio situado cerca del extremo superior de estos tubos, que actúa sobre las columnas de aire como un dedo apoyado ligeramente sobre una cuerda vibrante, o sea, favoreciendo la producción de los parciales de dichas columnas. Algunos instrumentos utilizan dos portavoces. El portavoz puede producir además, los sonidos que corresponden a la longitud acústica que determina sobre el tubo.

Para modificar la longitud real de un tubo sonoro se utilizan tres procedimientos: la vara, que estudiaremos al tratar del trombón (párrafo 102) por ser éste el único instrumento que la utiliza, las válvulas rotatorias y los pistones. Las figuras 52a y 52b representan una válvula rotatoria en reposo y conectada respectivamente; las figuras 53a y 53b representan lo mismo para un pistón. Es evidente que en las posiciones representadas por las figuras 52b y 53b, la longitud del tubo sonoro es aumentada en la longitud que controlan la válvula y el pistón.

Generalmente cuando la longitud es variada mediante pistones, uno de éstos, que se considera el primero, produce una serie de parciales situados un tono más abajo que la serie original; otro, considerado segundo, produce un descenso de un semitono y un tercero, produce un descenso de tono y medio. Los pistones pueden utilizarse simultáneamente para lograr descensos mayores. Algunos instrumentos poseen pistones que provocan descensos mayores que un tono y medio;

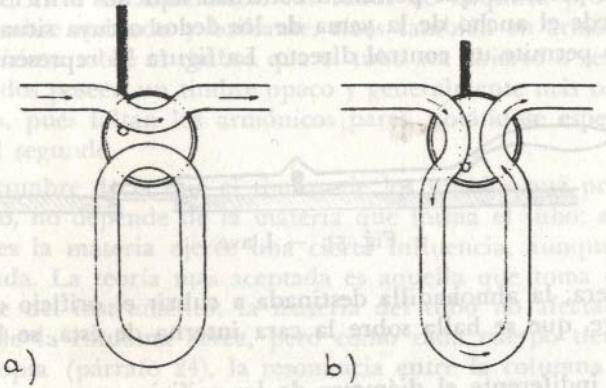


Fig. 52. — Válvula rotatoria: a) cerrada; b) abierta.

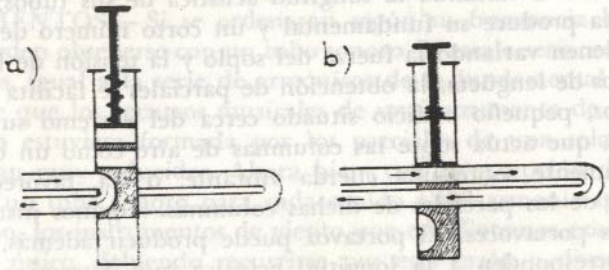


Fig. 53. — Pistón: a) cerrado; b) abierto.

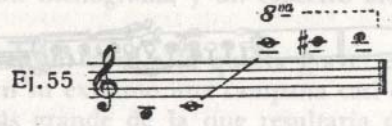
otros conectan longitudes de tubos menores que las iniciales, lográndose así columnas aéreas más cortas que la del tubo principal. Todo lo que hemos dicho respecto de los pistones puede aplicarse igualmente a las válvulas rotatorias.

Los instrumentos que utilizan tubos de boquilla forman su escala variando la longitud real del tubo principal; el número de los parciales que pueden obtenerse de cada longitud depende en primer lugar de las proporciones del tubo. Los tubos largos y estrechos producen parciales elevados con facilidad, ocurriendo lo contrario con los de sección grande.

Antiguamente existían instrumentos de boquilla como los bugles a llaves y el oficleide que formaban su escala variando la longitud acústica, pero han caído completamente en desuso.

95. LA FLAUTA. — La *flauta* (figura 54) es un instrumento de embocadura directa y tubo cilíndrico. Se la clasifica entre los instrumentos de madera, por haber sido construída durante mucho tiempo de este material; actualmente es casi siempre de plata.

La extensión normal de la flauta es DO_4-DO_7 (ejemplo 55), pudiendo alcanzar uno o dos semitonos más en el agudo; existen instrumentos con un semitono más en el grave.



Los sonidos desde DO_4 hasta $DO\#_5$ se obtienen como fundamentales; los sonidos más agudos mediante parciales de orden más elevado.

Su timbre es suave y dulce en las dos primeras octavas, mismo en el fuerte, y algo estridente en la octava más aguda. La figura 56b muestra el espectro armónico de un RE_6 producido sobre la flauta: obsérvese que sólo posee un armónico además de la fundamental. Es bastante común, en sonidos del registro agudo de este instrumento, obtener sonidos completamente puros, que registrados mediante un phonodeik, originan sinusoides (fig. 56a).

De la flauta derivan dos instrumentos: el *flautín* a la octava superior y la *flauta en Sol* [1], una quinta justa más grave que el instrumento tipo.

La flauta, el flautín y la flauta en sol son *flautas traverseras*, o sea que se tocan colocando el instrumento lateralmente; existen *flautas de pico*, llamadas también "flautas dulces", que son tubos de embocadura indirecta cuyo portaviento está transformado en boquilla. Las flautas de pico se construyen de tamaños diversos, formando una familia instrumental completa.

96. EL OBOE. — El *oboe* (figura 57) es un instrumento de lengüeta doble; su tubo es cónico y se construye invariablemente en madera: granadilla o ébano.

---

[1] La flauta en sol, por ser un instrumento a la quinta grave del instrumento tipo, debiera designarse como flauta en "fa", siguiendo la nomenclatura usual de los instrumentos transpositores. Esta anomalía proviene de que el instrumento tipo fué considerado durante largo tiempo como un instrumento en "re", aunque no se lo escribía como tal. Por lo tanto, la flauta en "sol" tiene este nombre porque se la considera a la quinta grave de la flauta en "re", actualmente flauta en "do".

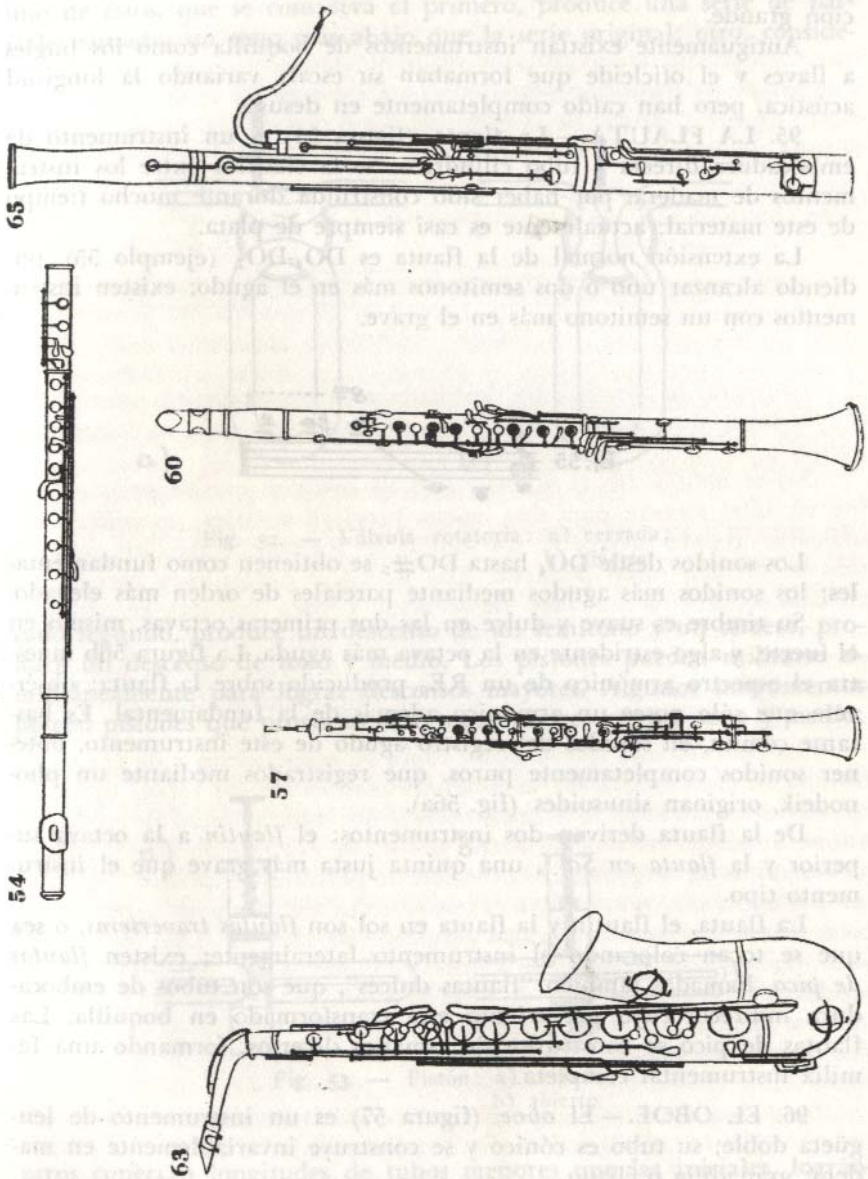
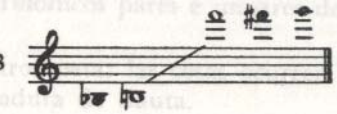


Fig. 54. — Flauta
Fig. 57. — Oboe
Fig. 60. — Clarinete
Fig. 63. — Saxófono
Fig. 65. — Fagot

LAMINA II. — Instrumentos de viento de madera.

La extensión normal del oboe es SI_3-FA_6, pero los buenos instrumentistas extienden este registro dos o tres semitonos hacia el agudo. Algunos instrumentos poseen un semitono más hacia el grave.

Ej. 58



Los sonidos desde SI_3 hasta DO $\#_5$ se obtienen como fundamentales; los sonidos restantes como armónicos de orden superior.

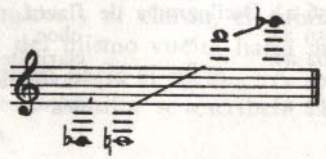
El timbre del oboe es nasal y penetrante; su espectro armónico es rico, predominando los armónicos segundo y quinto. Véanse en las figuras 59a y 59b, un oscilograma y un espectro armónico de sonidos de oboe.

El *corno inglés* es un oboe a la quinta grave; el tubo de este instrumento presenta en su extremo una campana casi esférica, cuya abertura es un poco más grande de la que resultaría de la prolongación del cono del tubo. El *oboe de amor* y el *heckelphon* u oboe barítono son oboes a la tercera menor grave y a la octava inferior respectivamente; ambos son transpositores lo mismo que el corno inglés.

97. EL CLARINETE. – El *clarinete* (figura 60), es un instrumento de tubo cilíndrico excitado por una lengüeta simple, generalmente de caña. Se construye casi siempre de madera: granadilla o ébano, aunque existen de metal y de ebonita. La boquilla es a menudo de otro material que el instrumento: ebonita o cristal.

La extensión del instrumento tipo (clarinete en DO), caído en desuso, era MI_3-SOL_6 con algunos semitonos más hacia el agudo. El clarinete más utilizado en la actualidad es el clarinete en SIb cuya extensión normal es RE_3-FA_6: algunos instrumentos poseen un semitono más en el grave. La extensión aguda depende de la habilidad del ejecutante, pudiendo llegarse hasta el SIb_6 y aun algo más allá.

Ej. 61



El clarinete, desde el punto de vista acústico, es uno de los instrumentos más interesantes pues presenta el fenómeno curioso de comportarse aproximadamente como tubo cerrado, aunque no lo es en realidad: cuando vibra produciendo las diferentes fundamentales de sus varias longitudes acústicas, se forma un nodo cerca de la lengüeta

y un vientre cerca de la campana (algo hacia afuera). Se admite que su comportamiento especial se debe a una acción conjunta del tubo y de la lengüeta simple.

La escala del clariente en SIb se obtiene con fundamentales desde el RE_3 hasta el LAb_4 y con tereceros armónicos desde el LA_4 hasta

LAMINA III.

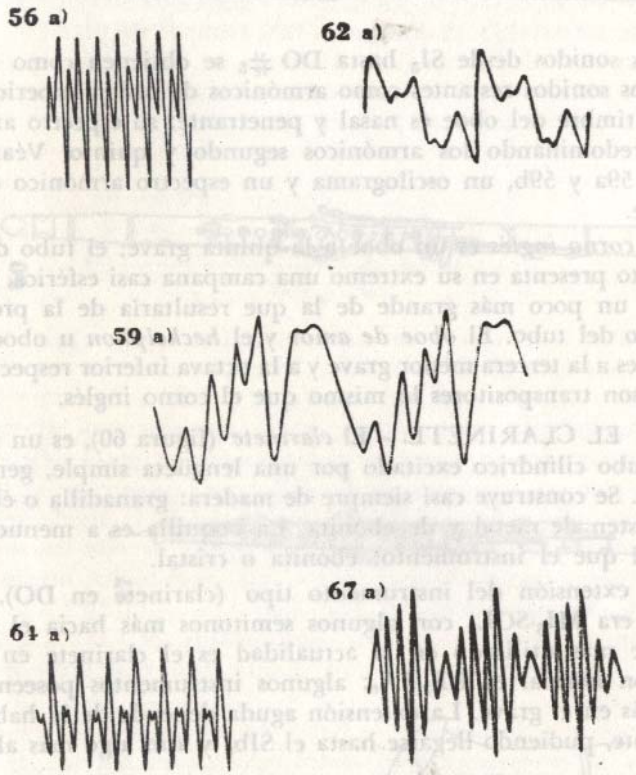


Fig. 56 a) Oscilograma de flauta.
„ 59 a) „ „ oboe.
„ 62 a) „ „ clarinete.
„ 64 a) „ „ saxófono.
„ 67 a) „ „ fagot.

el SIb_5: los sonidos agudos y sobreagudos se obtienen mediante armónicos impares de orden mayor.

Merecen citarse por su excepcional interés, las experiencias realizadas en el Conservatorio de Turín por los profesores Sres. Pedro Righini y Leonardo Savina, para esclarecer los curiosos fenómenos presentados por el clarinete.

La boquilla de clarinete se sustituye con:

a) Una embocadura de flauta: el clarinete funciona como tubo abierto, produciendo como sonido más grave el RE_4 y las demás fundamentales a la octava de las que producía antes; produce además los armónicos pares e impares de las diversas fundamentales.

b) Una boquilla de trompeta: las cosas ocurren del mismo modo que con la embocadura de flauta.

c) Una lengüeta doble de fagot: los fenómenos son más complicados, pues el tubo de clarinete se comporta ya como tubo abierto, ya como tubo cerrado. En efecto, se obtiene el RE_3 como sonido más grave, y luego con la misma longitud de tubo el LA_4, tercer armónico del anterior, o sea que el tubo actúa como cerrado; aumentando la presión sale el RE_5 que no podría salir en un tubo cerrado, es decir que en este momento el tubo se comporta como abierto y por lo tanto este RE_5 es segundo armónico de RE_4 y no cuarto de RE_3.

El timbre del clarinete varía mucho con la altura de los sonidos que se consideran: los sonidos más graves poseen un timbre hueco y misterioso y los sonidos agudos son brillantes y claros. La figura 62a muestra la onda de un sonido de clarinete registrado por un phonodeik. Observando el espectro armónico del clarinete (fig. 62b), puede verse que el segundo armónico falta por completo; en cambio los armónicos sexto y octavo son bastante intensos (más que el séptimo). Estos armónicos faltarían si el clarinete se comportara totalmente como tubo cerrado.

La familia del clarinete es numerosa; los principales instrumentos son: el *clarinete "requinto"* en Mib, una cuarta justa arriba del clarinete en Sib; el *clarinete contralto,* una octava más abajo del anterior; el *clarinete en La,* medio tono más bajo que el clarinete en Sib; el *clarinete bajo* o *clarón,* una octava más abajo que el clarinete en Sib. El "corno di bassetto" es un clarinete contralto en Fa (a la cuarta grave del clarinete en Sib), de tubo alargado para agrandar en una tercera mayor su extensión en la región grave.

En los clarinetes contraltos y el clarón, el tubo está doblado en sus extremos y la campana del mismo vuelta hacia arriba, para evitar que las ondas sonoras se dirijan hacia el suelo.

Los instrumentos de esta familia se escriben casi siempre como instrumentos transpositores.

98. LOS SAXÓFONOS. — Los *saxófonos* son instrumentos de lengüeta sencilla y boquilla parecida a la del clarinete; se construyen siempre de metal, pese a lo cual se los clasifica como instrumentos de madera, pues forman su escala como estos instrumentos. La forma de su tubo es cónica y los orificios que permiten modificar su longitud acústica son relativamente grandes con el objeto de reducir la impedancia de su columna de aire.

LAMINA IV.

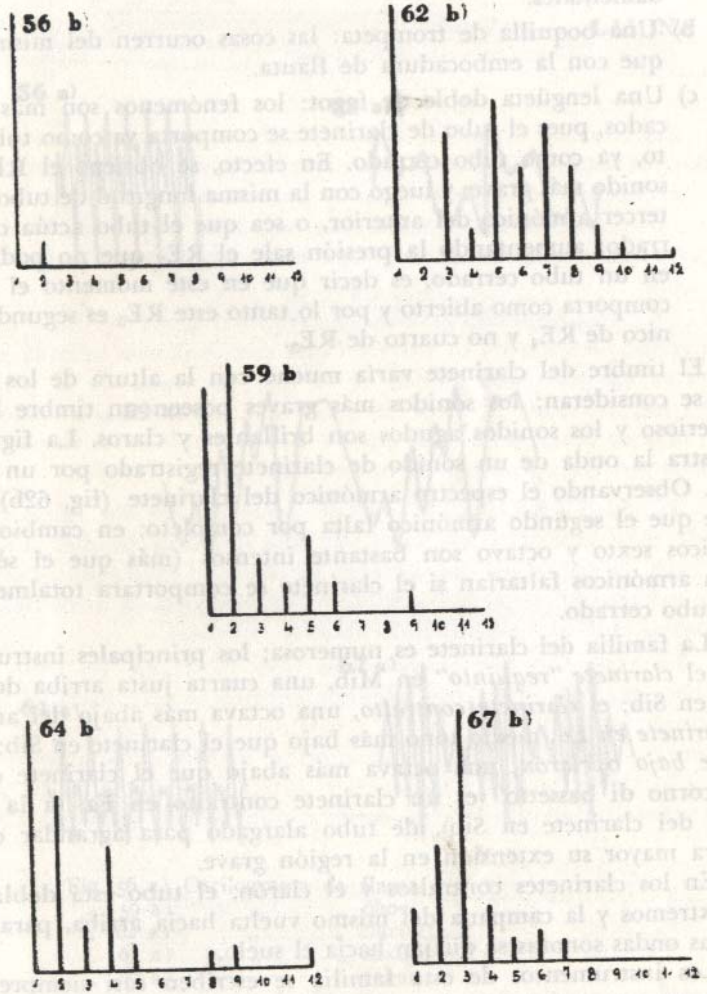


Fig. 56 b) Espectro armónico de flauta.
„ 59 b) „ „ „ oboe.
„ 62 b) „ „ „ clarinete.
„ 64 b) „ „ „ saxófono.
„ 67 b) „ „ „ fagot.

Fueron inventados en 1840 por el músico belga Adolfo Sax [1], siendo el fruto de adaptar una boquilla y lengüeta de clarinete a un oficleide (véase el párrafo 94).

Los saxófonos forman una familia completa cuyo instrumento tipo es el saxófono soprano en Sib; los principales miembros son: el *saxófono contralto* (fig. 63) y el *saxófono tenor*, cuyas tesituras están a la cuarta y a la octava graves respectivamente. Existen además el "sopranino", el barítono y el bajo. La extensión escrita de todos los saxófonos es SI_3-FA_6.

El timbre de los saxófonos es muy peculiar, pues recuerda simultáneamente al de los demás instrumentos de su grupo y al de los instrumentos de cuerda; su espectro armónico (figura 64b) es bastante extraño: se encuentran los cinco primeros armónicos, el octavo, noveno y duodécimo, faltando los demás. Véase en la figura 64a, un oscilograma de saxófono.

99. EL FAGOT. LOS SARRUSÓFONOS. — El *fagot* (fig. 65), es un instrumento de tubo cónico y lengüeta doble, que se comporta en todo sentido como un oboe grave. Se construye en madera, salvo su parte superior llamada la "S" por su forma, que siempre es de metal. La lengüeta del fagot es doble como la del oboe, pero más grande, como corresponde al mayor tamaño del tubo.

La extensión del fagot es considerable: Sib_1-MI_5 (ejemplo 66); algunos instrumentos llegan hasta el LA_1.

Ej. 66

Los sonidos desde SIb_1 hasta FA_3 se obtienen como fundamentales y desde FA $\#_3$ hasta FA_4 como segundos armónicos; los sonidos agudos y sobreagudos provienen de armónicos superiores.

El timbre del fagot es similar al del oboe, haciendo las reservas debidas a la frecuencia de los sonidos producidos; en la región aguda se asemeja notablemente al del saxófono. La figura 67b muestra el espectro sonoro de un sonido de fagot; obsérvese la marcada preeminencia del tercer armónico. Véase en la figura 67a un oscilograma de fagot.

El *contrafagot* es un fagot a la octava grave. Existía antiguamente un fagot tenor, una quinta más agudo que el instrumento tipo.

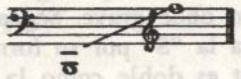
Los *sarrusófonos* son instrumentos de lengüeta doble y tubo cónico de metal, muy parecidos al fagot en cuanto a sus características acústicas. Forman una familia numerosa, similar a la de los saxófonos: sopranino, soprano, contralto, etc. El sarrusófono contrabajo reemplaza a menudo en las orquestas francesas al contrafagot.

[1] El verdadero nombre de Adolfo Sax era Antonio José Sax (1814-1894).

100. LA TROMPA. — La *trompa* (fig. 68) es un instrumento de tubo cónico en su mayor parte y sección pequeña. Se ejecuta mediante una boquilla profunda de paredes rectas (fig. 50); es siempre de metal, generalmente bronce.

Existen numerosos tipos de trompas, pero el instrumento más utilizado actualmente es la *trompa en Fa,* cuyo tubo principal tiene como fundamental FA_1 y que produce su escala mediante tres válvulas rotatorias que provocan descensos de dos, uno y tres semitonos respectivamente en la serie armónica; ésta es numerosa pues abarca desde el segundo hasta el armónico dieciséis, siendo el primero casi imposible de obtener. Muchas trompas poseen actualmente una válvula rotatoria que eleva el instrumento en una cuarta justa con lo cual se facilita la ejecución, obteniéndose las notas agudas como armónicos de orden más bajo. La extensión de este instrumento es grande, abarcando desde SI_1 hasta FA_5:

Ej. 69



La trompa y todos los instrumentos de boquilla admiten la *sordina,* cono truncado cuya forma corresponde a la forma interior de la campana dentro de la cual la coloca el ejecutante. La sordina modifica notablemente el timbre y la intensidad de los sonidos; según su forma, puede influir además sobre la altura de los parciales que produce el instrumento. Existen sordinas de madera, metal, cartón y otros materiales.

La forma de la trompa permite al ejecutante introducir la mano en el interior de la campana, actuando como una especie de sordina; los sonidos que se obtienen de esta manera se llaman "tapados". El timbre de los sonidos tapados es dulce en el piano y estridente en el forte; su utilidad en la técnica del instrumento es tal, que el manejo de las válvulas o pistones queda librado a la mano izquierda, caso único en los instrumentos de boquilla, para que la mano derecha pueda controlarlos.

El timbre de los sonidos de trompa es cálido y produce una sensación de gran volumen; su espectro armónico es pobre, predominando el segundo armónico (figuras 70a y 71a).

101. LA TROMPETA. — La *trompeta* (figura 72) es un instrumento cuyo tubo es parcialmente cilíndrico y de sección pequeña. Su boquilla es profunda y de paredes curvas (fig. 50b). Se la construye siempre de metal.

El instrumento que se utiliza corrientemente es la trompeta en Sib, cuyo tubo principal tiene como fundamental SIb_2; esta longitud

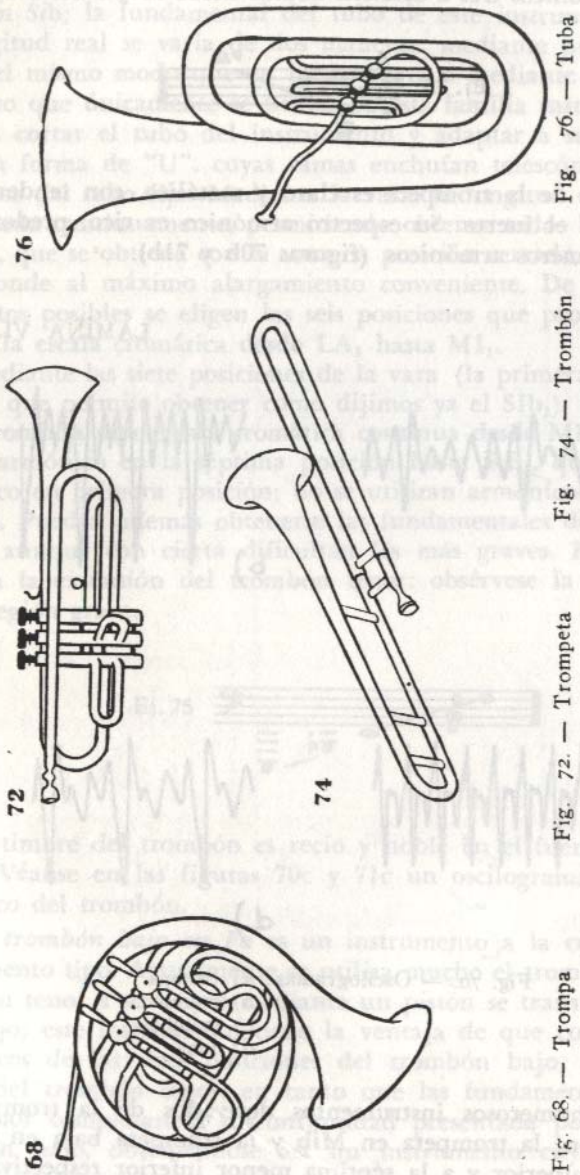
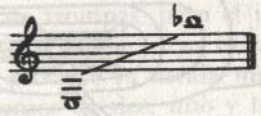


Fig. 76. — Tuba
Fig. 74. — Trombón
Fig. 72. — Trompeta
Fig. 68. — Trompa

LAMINA V. — Instrumentos de viento de metal.

se modifica mediante tres pistones que actúan del mismo modo que las válvulas de la trompa. La extensión de la trompeta, obtenida mediante los armónicos tres a dieciséis abarca desde MI_3 hasta Sib_5.

Ej. 73



El timbre de la trompeta es claro y metálico, con tendencia a la estridencia en el fuerte. Su espectro armónico es rico, predominando los cuatro primeros armónicos (figuras 70b y 71b).

LAMINA VI.

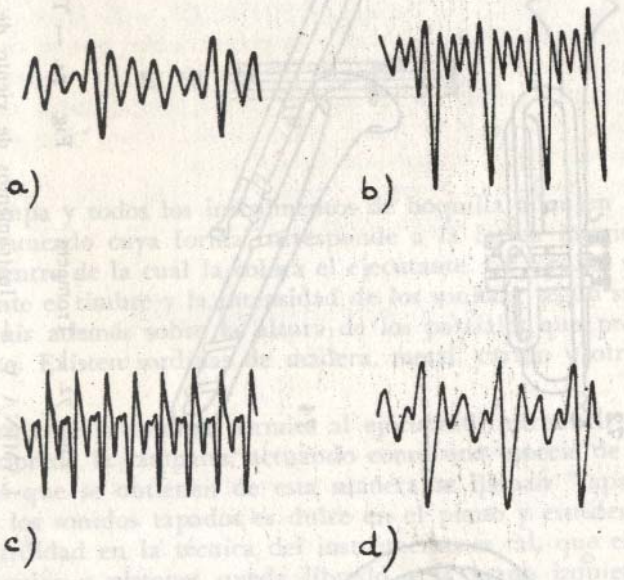


Fig. 70. — Oscilogramas: a) trompa
b) trompeta
c) trombón
d) tuba

Existen numerosos instrumentos derivados de la trompeta; los principales son: la trompeta en Mib y la trompeta baja en Do, a la cuarta justa superior y a la séptima menor inferior respectivamente [1].

102. EL TROMBON. — El *trombón* (fig. 74) es un instrumento cuyo tubo es de sección pequeña y cilíndrico en su mayor parte; se ejecuta utilizando una boquilla de forma cónica como la de la trompa, aunque de grano más grueso y menos profunda (figura 50c).

[1] La "trompeta marina" es un instrumento de cuerda completamente en desuso, utilizado en los siglos XVI y XVII.

El instrumento tipo de la familia de los trombones es el *trombón tenor en Si*b; la fundamental del tubo de este instrumento es SIb_1 y su longitud real se varía de dos maneras: mediante pistones, que actúan del mismo modo que en la trompeta o mediante la *vara*, procedimiento que únicamente se utiliza en esta familia instrumental. Consiste en cortar el tubo del instrumento y adaptar a sus extremos un tubo en forma de "U", cuyas ramas enchufan telescópicamente sobre las ramas del tubo fijo. Mediante la vara, la longitud del tubo puede ser variada continuamente, permitiendo obtener todos los sonidos desde SIb_1, que se obtiene con la vara en posición cerrada, hasta MI_1 que corresponde al máximo alargamiento conveniente. De todos los alargamientos posibles se eligen las seis posiciones que producen los sonidos de la escala cromática desde LA_1 hasta MI_1.

Mediante las siete posiciones de la vara (la primera es la posición cerrada que permite obtener como dijimos ya el SIb_1), puede formarse en el trombón una escala cromática continua desde MI_2, que es el segundo armónico en la séptima posición hasta RE_5, que es el décimo armónico en primera posición; no se utilizan armónicos de orden más elevado. Pueden además obtenerse las fundamentales de las siete posiciones, aunque con cierta dificultad las más graves. El ejemplo 143 muestra la extensión del trombón tenor; obsérvese la discontinuidad en la región grave.

Ej. 75

El timbre del trombón es recio y noble en el fuerte, suave en el piano. Véanse en las figuras 70c y 71c un oscilograma y el espectro armónico del trombón.

El *trombón bajo en Fa* es un instrumento a la cuarta grave del instrumento tipo. Actualmente se utiliza mucho el trombón tenor-bajo, trombón tenor a vara que mediante un pistón se transforma en trombón bajo; este instrumento tiene la ventaja de que con los segundos armónicos de las siete posiciones del trombón bajo, se completa la escala del trombón tenor, en tanto que las fundamentales del trombón tenor completan la discontinuidad presentada por la escala del trombón bajo, obteniéndose así un instrumento cuya extensión es SI_0-RE_5.

Existen el trombón contrabajo y el trombón contralto a la octava inferior y a la cuarta superior del instrumento tipo, pero se emplean poco, el primero porque su ejecución es penosa y el segundo por su timbre relativamente pobre.

Todos estos instrumentos existen igualmente con pistones, pero su timbre es inferior aunque ganan en agilidad.

103. SAXHORNOS Y SAXOTROMBAS. LA TUBA. – El creador de los saxófonos, Adolfo Sax, inventó en 1842 y 1850 dos nuevas familias instrumentales que denominó *saxhornos* y *saxotrombas* respectivamente. Todos estos instrumentos poseen tubos metálicos de forma cónica y sección grande con relación a su longitud; ésta se modifica mediante un número variable de pistones, tres en los instrumentos agudos de cada familia (saxhornos o saxotrombas sopranino, soprano, contralto y tenor), y de cuatro a seis en los instrumentos graves (saxhornos o saxotrombas barítono, bajo y contrabajo).

LAMINA VII.

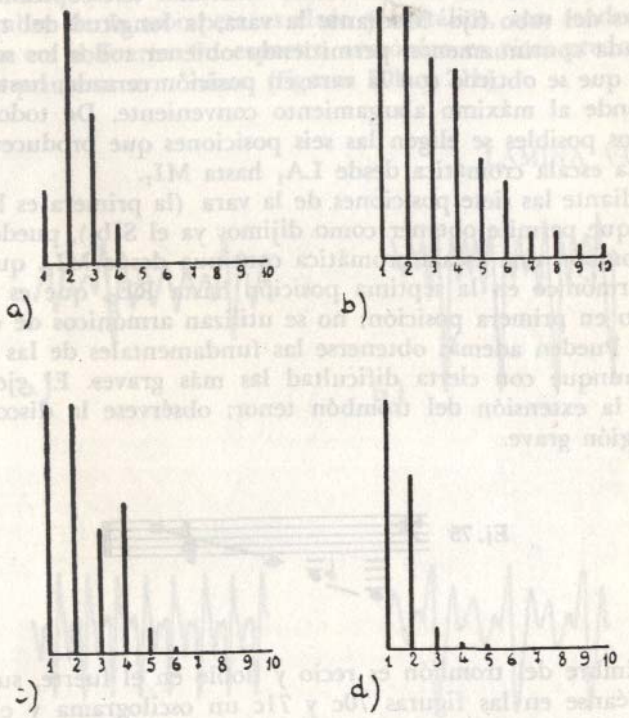


Fig. 71. — Espectros armónicos: a) trompa
b) trompeta
c) trombón
d) tuba

La boquilla de los saxhornos es profunda como la de las trompas y de paredes interiores ligeramente curvas, mientras que la de las saxotrombas es casi semiesférica; por otra parte, el cono formado por los

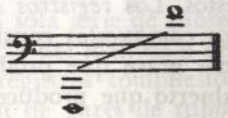
saxhornos se abre más rápidamente que el de las saxotrombas. Estas características influyen sobre el timbre de ambas familias que es oscuro y difuso en los saxhornos y más claro y compacto en las sexotrombas.

Los saxhornos y saxotrombas agudos suelen designarse con el nombre de *bugles*[1]; para los instrumentos graves existe una gran variedad de nombres según los países, y los pequeños detalles técnicos que les agregan los fabricantes de instrumentos: se los conoce como tubas, bombardones, eufonios, helicones, pelitones, etc.

Las *tubas* que se utilizan actualmente en las orquestas sinfónicas son saxhornos o saxotrombas graves, dependiendo la elección de uno u otro tipo de instrumento, del timbre que se desea; su característica más notable es la facilidad con que emiten las fundamentales de las diversas longitudes, debido al tipo de boquilla que se emplea y a las proporciones del tubo. Véase en la figura 50d un corte longitudinal de boquilla de tuba.

La *tuba baja en fa* (figura 76) posee una extensión de tres octavas (ejemplo 77) obtenida mediante los ocho primeros armónicos.

Ej. 77



El espectro armónico de la tuba (fig. 71d) es pobre, predominando la fundamental y el segundo armónico; puede verse en la figura 70d el oscilograma corespondiente a un sonido de este instrumento.

La *tuba contrabajo* ene SIb produce sonidos a la quinta grave del instrumento anterior.

Las *tubas wagnerianas,* ideadas por Ricardo Wagner, poseen un timbre intermedio entre las trompas y las tubas; su tubo es parecido al de las saxotrombas, pero se ejecutan con una boquilla semejante a la de trompa, aunque más grande y de grano más grueso. Existen dos tipos de tubas wagnerianas: la tuba tenor cuya extensión es SIb_2-FA_3 y la tuba baja a la octava grave de la anterior.

La *corneta* es un instrumento intermedio entre el saxhorno soprano y la trompeta, cuya extensión posee; se la confunde a menudo con este último instrumento aunque difieren bastante entre sí. La boquilla de corneta es menor que la de trompeta y la porción cónica se abre más rápidamente. Su agilidad es mayor y su timbre es dulce y agradable en el piano, pero algo vulgar en el fuerte.

104. EL ÓRGANO. – El *órgano,* llamado también órgano neumático debe considerarse acústicamente como una colección de instru-

[1] No deben confundirse estos bugles con los bugles a llaves que eran los miembros agudos de la familia del oficleide.

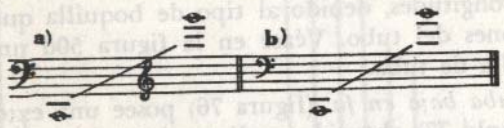
UNIVERSIDAD DE CALDAS

mentos; en efecto, sus diversos *registros* o *juegos* formados por series de tubos semejantes, constituyen otros tantos instrumentos.

El órgano posee varios teclados, llamándose *manuales* aquellos que son accionados por las manos, y *pedalera* el que accionan los pies. El número de manuales puede llegar excepcionalmente hasta siete, siendo lo más común el órgano de tres manuales. En éste, el manual superior se llama *positivo*, el manual intermedio *recitativo* y el manual más cercano al ejecutante, *gran órgano*.

Los manuales constan generalmente de 56 teclas; su extensión escrita es DO_2-SOL_6 (ejemplo 78a). La pedalera consta de 32 teclas llamadas pedales; su extensión escrita es DO_2-SOL_4 (ejemplo 78b).

Ej. 78



Cada manual y la pedalera accionan varios registros; éstos pueden ser simples o compuestos. Los *registros simples* poseen un tubo para cada tecla, los *registros compuestos* constan de dos o más tubos para cada nota. La nota más grave que produce cada registro es un DO; la longitud de tubo abierto que produce (o necesaria para producir) dicho DO permite establecer una relación entre la extensión del registro y la extensión general del instrumento. Por lo tanto, si el DO más grave de un registro es:

si es DO_0 el registro será de 32 pies:
DO_1 „ „ „ „ 16 „ ; etc.

La extensión total del órgano abarca desde DO_0, obtenido con la nota más baja de los registros de 32 pies, hasta SOL_9, obtenido con las notas más agudas de los registros de un pie. Como puede verse, esta extensión es mayor que la del piano y también que la de toda la orquesta reunida.

Los registros se clasifican en dos grandes grupos: los *juegos de fondo* o *flautas*; formados por tubos de embocadura indirecta, y los *juegos de lengüeta*, llamados también *lengüetería*, formados por tubos asociados a lengüetas batientes simples en que la lengüeta determina la frecuencia del sonido, actuando el tubo sólo como resonador.

Los tubos se construyen de madera o de metal; su forma es sumamente diversa con el objeto de variar los timbres y casi siempre se los utiliza rectos.

Los juegos de fondo se clasifican en *flautas abiertas* y *flautas cerradas* según que su tubo sea abierto o cerrado. Entre las flautas abiertas citaremos: el *diapasón*, formado por tubos anchos que producen sonidos pobres en armónicos, en los que predomina la fundamental; el *principal* formado por tubos de ancho mediano, cuyo timbre recuerda al de los saxhornos, y la *viola da gamba* y el *salicional*, tubos estrechos que producen sonidos que recuerdan los instrumentos de cuerda. Entre las flautas cerradas de tubo ancho citaremos el *bordón*, de sonidos casi puros, y entre las de tubo estrecho, el *quintatón* que produce sonidos en los cuales falta el segundo armónico y predomina el tercero.

Los juegos de lengüeta producen sonidos muy ricos en armónicos cuyo timbre es brillante y algo estridente en el fuerte; los registros de esta clase suelen dividirse en dos grupos: *registros solistas* y *registros corales* o de conjunto. La lengüeta de los registros solistas es corta; imitan a los instrumentos de la orquesta, aunque conservando su carácter propio. Los tubos de los registros solistas pueden ser cilíndricos o cilíndrico-cónicos; entre los primeros, el *clarinete* y el *cromorno*, y entre los segundos el *oboe*, el *fagot* y la *voz humana*. Los registros corales poseen tubos de torma cónica excitados por lengüetas largas; citaremos la *bombarda* y la *contrabombarda*, la *trompeta* y el *clarín*.

Los registros pueden estar repetidos a diversa altura; así existen principales de 16, 8, 4 y 2 pies, bordones de 32, 16 y 8 pies, clarines de 8 y 4 pies, etc.

Todos los registros que hemos estudiado hasta ahora son registros simples, constituídos por una sola serie de tubos; existen registros compuestos en los que a cada tecla del manual o de la pedalera responden dos o más tubos. Algunos registros compuestos como el *unda maris* y la *voz celeste* se componen de pares de tubos ligeramente discordados, con lo cual se obtienen pulsaciones de efecto expresivo; otros, llamados generalmente *mixturas*, acompañan cada sonido con un cortejo variable de armónicos: el *carrillón* acompaña cada sonido con sus armónicos 3, 5 y 8; la *corneta* con los armónicos 2, 3, 4 y 5; el *cimbalo* y la *fornitura* son aún más complejos. Todos los registros compuestos se componen de juegos de fondo.

Los tubos de órgano se desafinan fácilmente por influencia de la temperatura, la suciedad y muchos otros factores; en las flautas abiertas la afinación se corrige variando la luz de la embocadura, en las flautas cerradas corriendo el tapón que las cierra y en los tubos de lengüeta, variando la longitud de ésta.

La presión del aire debe ser invariable para cada registro. Debido a ésto, el órgano no es expresivo pues no puede ejecutar verdaderos crescendos o diminuendos. La expresión se logra artificialmente mediante la adición o sustracción de registros y mediante la *caja expresiva*, celosías que rodean los tubos y que se abren o cierran, provocando un aumento o disminución de la sonoridad.

La composición de los órganos ha variado muchísimo según las tendencias de cada época; los órganos de los siglos XV y XVI contenían registros compuestos por lengüetas batientes no asociadas a tubos sonoros, pero cayeron en desuso debido a su sonoridad chillona. En los siglos XVII y XVIII, los órganos se componían principalmente de juegos de fondo simples y de mixturas. El siglo XIX y el principio del nuestro vieron el apogeo del órgano llamado "romántico" con nume-

rosos registros de lengüeta, efectos expresivos muy exagerados, presión de aire elevada, etc. Para dar una idea de la hipertrofia a que se llegó en materia de construcción de órganos, citaremos el órgano construído por Richard y Midmer-Losh en Atlantic City, Nueva Jersey: comprende siete manuales, pedalera, 32.882 tubos (incluso uno de 64 pies de alto), que forman 1233 registros divididos en 19 secciones; puede ejecutarse además desde seis lugares diferentes.

Actualmente se tiende a restablecer el equilibrio entre los juegos de fondo y los de lengüeta, adoptándose combinaciones de registros similares a los del siglo XVIII y presiones de aire menores.

105. EL ARMONIO. — El *armonio* es un instrumento de viento que produce sonido mediante lengüetas libres no asociadas a tubos sonoros; el tipo más corriente de armonio posee un solo teclado de cinco octavas y carece de pedalera. A cada mitad de su teclado le corresponden cuatro registros: dos de 8 pies, uno de 4 y uno de 16 pies, mediante los cuales alcanza una extensión que abarca desde DO_1 hasta DO_8.

El timbre del armonio es suave e íntimo; es poco variado debido a que el número de registros es reducido. Su característica más notable es la de poder aumentar y disminuir la intensidad del sonido con sólo variar la fuerza del aire, pues las lengüetas libres producen sonidos cuya frecuencia no depende de la fuerza de la corriente aérea que las excita; por esta razón suele llamarse al armonio con el nombre de "órgano expresivo" para diferenciarlo del órgano, que como dijimos ya, es inexpresivo debido a que la presión del aire en los registros debe ser constante.

106. LA VOZ HUMANA: VOCALES Y CONSONANTES. — La voz humana es producida en la laringe, cuya parte esencial, la glotis, constituye el verdadero órgano de fonación del hombre.

El aire procedente de los pulmones, es forzado durante la espiración a través de la glotis, haciendo vibrar las cuerdas vocales, que en número de cuatro cierran la laringe; éstas son repliegues de la mucosa laringea y están agrupadas en dos pares llamados superior e inferior. Este sistema de producción del sonido asemeja cada par de cuerdas vocales a una lengüeta doble membranácea. Las cavidades de la cabeza, relacionadas con el sistema respiratorio y nasofaríngeo (garganta, boca, nariz, senos maxilares y frontales), actúan como resonadores.

El aparato de fonación puede ser en parte controlado conscientemente por el que habla o canta; se convierte con ésto en un instrumento de timbre y altura sumamente variable. La variación de la intensidad depende lógicamente de la fuerza de la espiración.

En el hombre las cuerdas vocales son algo más largas y más gruesas que en la mujer y el niño, por lo cual produce sonidos más graves. La extensión de las voces es aproximadamente de dos octavas para cada voz.

El timbre de la voz humana es muy rico en armónicos, habiéndose observado espectros que contenían hasta 35 armónicos diferentes.

Para obtener comprensibilidad en el habla es indispensable la presencia de armónicos cuya frecuencia se halla entre 1800 y 3500 ciclos [1].

Las vocales se producen como sonidos y cada una tiene su espectro propio: la "A" y la "U" tienen fundamental y tercer armónico fuertes, segundo y cuarto débiles; la "E" y la "O", más o menos lo contrario, mientras que la "I" tiene los primeros armónicos débiles y recién el quinto y sexto fuertes.

Las consonantes se clasifican más bien como ruidos y son de dos clases: silenciosas, en que no intervienen las cuerdas vocales, y habladas en que sí toman parte. La mayoría de las consonantes se originan algo bruscamente, por lo que contienen armónicos transitorios.

107. EL VIBRATO VOCAL E INSTRUMENTAL. — El *vibrato* es un fenómeno de gran importancia dentro del conjunto de factores que embellecen o afean el discurso musical. Puede definirse como una pulsación periódica que afecta el timbre, la altura y la intensidad de un sonido, confiriéndole flexibilidad y dulzura.

En el canto, el análisis efectuado sobre grabaciones realizadas por grandes artistas, revela una oscilación de altura de casi un semitono en total, unas seis o siete veces por segundo; y en cuanto a la intensidad, de unos dos o tres decibeles. La voz hablada revela vibrato, pero sólo en forma ocasional.

En los instrumentos de cuerda, la variación de intensidad es la misma, pero la de altura es menor (un cuarto de tono en total). La producción del vibrato en este caso es visible, pues se ve claramente el movimiento oscilante realizado por el dedo que pisa la cuerda.

En los instrumentos de viento el vibrato es más irregular que en los de cuerda; se lo obtiene con relativa facilidad variando la fuerza del soplo. Realza la expresión de las líneas melódicas pero conviene evitarlo en las armonías.

[1] Por esta razón los aparatos de radio de mala calidad, insuficientes para trasmitir música sin grave distorsión, trasmiten claramente la palabra, pues sólo es necesaria para la inteligibilidad, que puedan escucharse las frecuencias mencionadas que son las de más fácil transmisión en esta clase de aparatos.

CAPITULO XIII

Varillas vibrantes. Vibraciones longitudinales de las varillas. — Vibraciones transversales de las varillas. El diapasón. — Membranas y placas vibrantes. Figuras acústicas de Chladni. — Instrumentos de percusión. — Instrumentos de percusión de entonación definida. Los timbales. — Las campanas. — El xilófono y la celesta. — Instrumentos de percusión de entonación indefinida.

108. VARILLAS VIBRANTES. VIBRACIONES LONGITUDINALES DE LAS VARILLAS. — Las *varillas,* cuerpos rígidos de longitud notablemente mayor que las dimensiones restantes, pueden vibrar de varias maneras: longitudinalmente, transversalmente y con vibraciones torsionales o de torsión. Consideraremos sólo las dos primeras. Recuérdese que las placas y varillas, por ser cuerpos rígidos, necesitan sólo un punto de apoyo para poder vibrar, aunque pueden apoyarse en más de uno; en ésto se diferencian de las cuerdas y membranas que necesitan dos puntos de apoyo como mínimo para ser sometidas a la tensión conveniente.

Las varillas se clasifican en *simétricas,* cuando poseen un punto de apoyo único situado en su centro o puntos equidistantes de éste, y *asimétricas,* cuando están apoyadas sobre puntos dispuestos asimétricamente o fijas en un punto único distinto del centro.

Cuando las varillas vibran longitudinalmente, se comportan como tubos sonoros, abiertos las simétricas y cerrados las asimétricas. Por lo tanto, producen su fundamental y parciales conforme a las leyes ya estudiadas (párrafo 86). La frecuencia de los sonidos obtenidos es independiente de la sección de la varilla, siempre que dicha sección sea pequeña respecto de la longitud.

Para provocar este tipo de vibraciones, la varilla se frotará fuertemente en sentido longitudinal con una gamuza o un trapo untado con pez.

109. VIBRACIONES TRANSVERSALES DE LAS VARILLAS. EL DIAPASON. — Las leyes a que obedecen las vibraciones transversales de las varillas son totalmente distintas de las anteriores.

La frecuencia (n) de la fundamental producida por una varilla asimétrica que vibra transversalmente, es directamente proporcional

al espesor de la varilla (considerado en la dirección que se efectúa la vibración), e inversamente proporcional al cuadrado de su longitud. Depende también de la substancia de que está formada la varilla.

Los parciales que producen las varillas asimétricas vibrando transversalmente son discordantes; la relación de los cinco primeros con la fundamental es: n; 6,25n; 17,5n; 34,4n; 56,5n y 84n.

Obsérvese que la serie crece rápidamente; los parciales de frecuencia elevada son transitorios.

Las figuras 79a, 79b y 79c muestran una varilla asimétrica produciendo su fundamental, primero y segundo parcial respectivamente. Obsérvese que los nodos en los parciales no determinan secciones iguales sobre la varilla; a ésto se debe la relación inarmónica entre ellos y la fundamental. Para variar la frecuencia de una varilla de este tipo

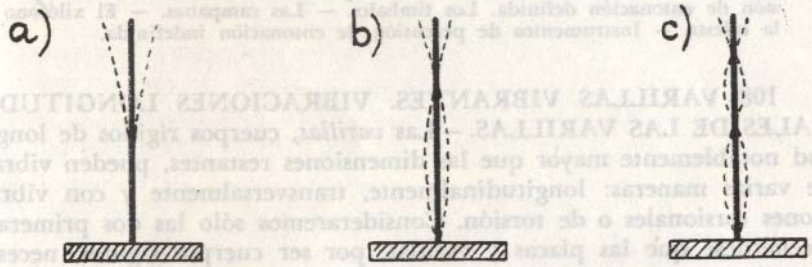


Fig. 79. — Vibraciones transversales de una varilla asimétrica:
a) fundamental
b) 1er. parcial
c) 2do. parcial

sin cambiar su longitud, se disminuye su espesor cerca del extremo fijo o cerca del extremo libre: en el primer caso la frecuencia aumenta y en el segundo disminuye.

Estudiaremos ahora las vibraciones de las varillas simétricas con dos puntos de apoyo equidistantes del punto medio; es el tipo de varillas empleadas en el xilófono (párrafo 114). Estas varillas produciendo su fundamental poseen dos nodos que distan 0,224 L desde cada extremo ("L" es la longitud total de la varilla), y un vientre en el medio. Para obtener la fundamental, la excitación de la varilla debe realizarse en el punto medio. La frecuencia de la fundamental varía inversamente al cuadrado de la longitud. Si la varilla se suspende de uno de sus puntos nodales, vibra de la misma manera. Los parciales que produce una varilla de este tipo son discordantes como en el caso anterior; su relación es la siguiente: n; 2,76n; 5,4n...

Las fundamentales que produce una misma varilla vibrando transversalmente como varilla simétrica y como varilla asimétrica son distintas; la primera es más aguda y guarda la relación 25 a 4 con la segunda.

Los diapasones en forma de "U" pueden considerarse formados por dos varillas asimétricas (las ramas), que vibran transversalmente, unidas por su extremo fijo a otra varilla asimétrica (el mango), que vibra longitudinalmente. Obsérvese que si el mango no vibrara longitudinalmente, al tomarlo para apoyarlo sobre una mesa u otro resonador cualquiera, la vibración cesaría. La afinación de los diapasones se realiza según el método antes mencionado: si se raspan las puntas disminuyendo su ancho, la frecuencia aumenta y lo contrario ocurre cuando se lima la parte curva cercana al mango, donde se encuentran los nodos.

110. MEMBRANAS Y PLACAS VIBRANTES. FIGURAS ACUSTICAS DE CHLADNI. — Las *membranas* y *placas* son cuerpos de superficie grande con relación a su espesor; excitadas por percusión o fricción emiten sonidos caracterizados por un complejo grande de parciales discordantes. Las membranas necesitan tensión previa para vibrar: las placas, debido a su rigidez, sólo necesitan un punto de apoyo.

El físico alemán Florencio Chladni realizó profundos estudios sobre las vibraciones de las placas y membranas; descubrió que en estos cuerpos no existen nodos y vientres propiamente dichos, sino líneas de puntos donde la vibración es nula o pequeña, llamadas *líneas nodales*, y zonas demarcadas por estas líneas donde la vibración alcanza valores máximos llamadas *zonas ventrales*. El método seguido por Chladni consiste en espolvorear la superficie de la placa o membrana que desea estudiarse con licopodio o arenilla; al excitar el cuerpo sonoro, las partículas son desplazadas por la vibración de las zonas ventrales, acumulándose sobre las líneas nodales y formando figuras muy variadas que llevan el nombre de su descubridor, o sea *figuras acústicas* de Chladni (figuras 80a y 80b). Las zonas ventrales contiguas vibran con fases contrarias, mientras una sube, otra baja y viceversa.

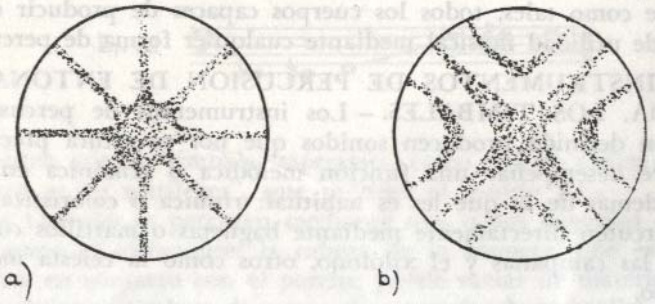


Fig. 80. — Figuras acústicas de Chladni.

Las leyes más importantes referentes a la vibración de placas y membranas fueron formuladas por Chladni y son dos:

1A. LEY. — *La frecuencia de dos placas o membranas de igual superficie es inversamente proporcional a su espesor.*

2A. LEY. — *La frecuencia de dos placas o membranas de idéntico espesor, varía inversamente al cuadrado de su diámetro.*

Ambas leyes pueden resumirse en una, diciendo: *"si dos placas o membranas son cuerpos geométricamente semejantes, sus frecuencias varían inversamente a sus dimensiones homólogas".*

111. INSTRUMENTOS DE PERCUSION. — Se entienden por instrumentos de percusión, aquellos que producen sonido cuando son excitados por percusión directa o indirecta; los instrumentos de cuerda percutida que pertenecen en realidad a esta categoría, no se estudian dentro de ella, pues sus características y posibilidades musicales son muy diferentes.

Los instrumentos de percusión se clasifican habitualmente en dos grupos: *instrumentos de entonación definida* e *instrumentos de entonación indefinida.* Estos últimos producen ruidos más bien que sonidos. En líneas generales puede decirse que la función musical de los instrumentos de percusión es rítmica; en efecto, permiten ejecutar toda clase de ritmos con precisión y claridad. Se los utiliza además como elementos de color orquestal.

Acústicamente, son clasificables como membranas, placas y varillas; entre los instrumentos que utilizan membranas citaremos los timbales, el bombo, el tambor militar y la pandereta; entre aquellos clasificables como placas vibrantes, citaremos los címbalos, las campanas y el tam-tam; y entre los que utilizan varillas vibrantes: la celesta, el xilófono y el triángulo.

La percusión se efectúa de maneras muy diversas mediante varillas metálicas como en el triángulo, mediante *baguetas* que rematan en una cabeza de fieltro, de madera o de esponja, golpeando un cuerpo sonoro contra otro como en los platillos, indirectamente mediante un teclado como en la celesta, etc.

Este grupo de instrumentos es muy grande. En efecto, pueden clasificarse como tales, todos los cuerpos capaces de producir sonidos o ruidos de utilidad musical mediante cualquier forma de percusión [1].

112. INSTRUMENTOS DE PERCUSION DE ENTONACION DEFINIDA. LOS TIMBALES. — Los instrumentos de percusión de entonación definida producen sonidos que por su altura precisa son capaces de desempeñar una función melódica o armónica en la orquesta, además de la que les es habitual: rítmica o colorística. Algunos se percuten directamente mediante baguetas o martillos como los timbales, las campanas y el xilófono, otros como la celesta mediante un teclado.

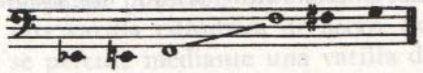
[1] Recuérdense los yunques utilizados por Wagner en "El oro del Rhin".

Los *timbales,* designados siempre en plural pues se los emplea habitualmente en parejas y a veces en número mayor, son cuerpos huecos semiesféricos sobre los cuales se tiende una membrana circular llamada *parche,* que los cierra totalmente (fig. 81). La tensión del parche, regulada mediante tornillos colocados en su borde, permite variar la frecuencia de los sonidos que pueden obtenerse, dentro del ámbito de una quinta; en los timbales modernos, un pedal convenientemente colocado en la parte inferior reemplaza ventajosamente a los tornillos, pues permite cambiar rápidamente su afinación. El aire contenido dentro del instrumento actúa como resonador y es violentamente agitado durante la percusión; para que no se generen presiones excesivas durante ésta, los timbales poseen en la base un orificio circular que comunica además el aire interior del instrumento con el exterior.

Fig. 81. — Timbal.

En un par de timbales, el timbal más grande produce sonidos que llegan normalmente desde FA_2 hasta DO_3, y el timbal pequeño desde SIb_2 hasta FA_3. La extensión conjunta de los timbales es por lo tanto: FA_2-FA_3, pudiendo obtenerse dos semitonos adicionales en ambas direcciones.

Ej. 82



Existen además timbales especiales, como el que utiliza Ravel en "L'enfant et les sortilèges", que produce el sonido RE_4.

Los timbales se percuten mediante una o dos baguetas que tiene en su mano el ejecutante; la cabeza de la bagueta, que es la parte que entra en contacto con el parche, puede variar de material, con lo cual se obtienen timbres diversos; el punto donde se realiza la percusión modifica el timbre y la intensidad de los sonidos que produce

el instrumento. Con estos instrumentos pueden obtenerse efectos dinámicos extraordinarios, pasando desde un pianísimo casi inaudible hasta un fortísimo ensordecedor.

113. LAS CAMPANAS. – Todas las superficies curvas se denominan convencionalmente en acústica *campanas,* pero nos limitaremos a considerar el tipo habitual, o sea placas vibrantes de forma aproximadamente cónica, que se percuten mediante un martillo llamado *badajo.* Por sus características acústicas, guardan la misma relación con las placas planas que la existente entre el diapasón y las varillas rectas.

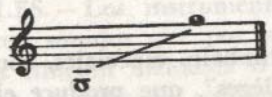
La complejidad de las vibraciones de las campanas es tal, que su teoría aún no se halla establecida totalmente; poseen como todas las placas, líneas nodales y zonas ventrales intermedias. La frecuencia de las campanas varía inversamente con sus dimensiones. Existe una ley, utilizada por los fabricantes de estos instrumentos, que dice: *"la frecuencia de una campana es inversamente proporcional a la raíz cúbica de su peso".*

El timbre de las campanas es muy peculiar: su sonido se caracteriza por contener numerosos parciales transitorios muy discordantes. Al escucharse el tañido de una campana, pueden oírse varios sonidos: uno, que produce la campana en el instante que se tañe; otro, que se escucha cuando el primero ha desaparecido y que persiste durante cierto tiempo, y dos o tres parciales superiores.

La afinación de las campanas presenta serios problemas, pues la nota que produce el tañido es discordante con la que produce la campana instantes después; cuanto más se afina una campana eliminando los parciales discordantes, menos timbre de campana posee.

El peso de una campana capaz de producir un DO_4 es más o menos de 20 toneladas; es evidente que las campanas verdaderas son poco prácticas para utilizar en orquesta por su peso y costo. Por las razones antedichas, se utilizan en la orquesta *campanas tubulares* que reemplazan con suficiente eficacia a las verdaderas. Son tubos huecos de metal de un mismo diámetro y diferente longitud, que se cuelgan de un marco de madera y se percuten directamente mediante martillos metálicos. Los juegos de campanas tubulares poseen a veces una sordina que se maneja mediante un pedal; se construyen formando una escala diatónica o cromática, según los casos, dentro del ámbito SOL_3-SOL_5.

Ej. 83

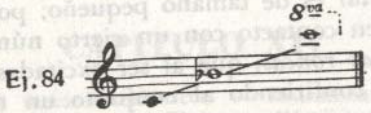


Los *carillones* son juegos de campanas actuados por un teclado mediante el cual pueden ejecutarse melodías sencillas; conviene evitar los acordes, que rara vez suenan bien debido a la acumulación de parciales discordantes.

114. EL XILOFONO Y LA CELESTA. – El *xilófono* o xilofón es un instrumento que consta de un número variable de varillas simétricas de madera (nogal, palo de rosa), que se hacen vibrar por percusión directa mediante baguetas de idéntica substancia. Cada varilla está colocada sobre un resonador que aumenta la sonoridad obtenida.

La extensión más corriente de los xilófonos abarca desde SIb_4 hasta DO_7, existiendo algunos que se extienden hasta el DO_4 (ejemplo 84); la disposición de las varillas recuerda el teclado del piano.

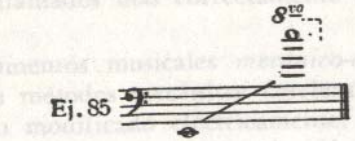
Ej. 84



El xilófono produce un golpeteo seco de efecto curioso, y, correctamente ejecutado, puede realizar pasajes brillantes en escalas y arpegios.

La *celesta,* instrumento inventado y llevado a su mayor perfección por Mustel [1], consiste en un juego de pequeñas varillas de acero que son percutidas mediante un teclado por pequeños martillos con los cuales se obtiene un sonido delicado. A cada varilla corresponde un resonador, consistente en un tubo de madera. La extensión actual del instrumento es DO_4-DO_8.

Ej. 85



115. INSTRUMENTOS DE PERCUSION DE ENTONACION INDEFINIDA. – Los instrumentos de percusión de entonación indefinida producen sonidos cuya frecuencia es difícil o imposible de determinar, que deben considerarse más bien como ruidos; limitaremos nuestro estudio a los principales, pues son muy numerosos.

El *triángulo,* es una varilla cilíndrica de acero, doblada como indica su nombre, que se percute mediante una varilla del mismo metal. Produce un tintineo leve que bien empleado permite obtener efectos interesantes.

Los *címbalos* o *platillos* son dos placas de bronce que producen sonidos al entrechocarse. Éstos no deben chocar de frente sino mediante un movimiento lateral, pues así se obtiene el sonido característico del instrumento. Puede utilizarse uno solo, excitado por una bagueta de timbal o de tambor militar.

[1] Víctor Mustel, fabricante de armonios de origen francés (1815-1890).

UNIVERSIDAD DE CALDAS

El *tam-tam* o *gong*, instrumento de origen chino, consiste en una gran placa de bronce moldeada a martillo; sus bordes, vueltos en ángulo recto, no participan del movimiento vibratorio. El sonido que produce es extraño y sugestivo, pero su obtención es difícil, pues en manos inexpertas sólo se obtienen sonidos opacos y de poca intensidad.

El *bombo* es un tambor de gran tamaño que posee dos parches que se percuten mediante baguetas de cabeza gruesa, de paño u otro material suave. Produce sonidos muy resonantes, cuya intensidad es susceptible de variaciones extremas.

El *tambor militar* es de tamaño pequeño; posee dos parches, uno de los cuales está en contacto con un cierto número de cuerdas tensas, llamadas *cuerdas roncas*, que al ser excitadas por las vibraciones del parche, vibran confiriendo al conjunto un timbre característico; puede decirse que las cuerdas roncas crean líneas nodales sobre el parche al cual están adosadas. Se percute mediante dos baguetas de madera dura sobre el parche que no posee las cuerdas roncas.

La *pandereta* es un pequeño tambor formado por un solo parche tendido sobre un aro de madera; este aro está perforado a espacios regulares para admitir la inserción de pequeñas plaquitas metálicas que tintinean al percutirse el parche. Puede ejecutarse de varias maneras: golpeándola con los nudillos para producir sonidos separados, sacudiéndola sin percutir el parche, con lo que se obtiene un trémolo sobre las plaquitas o pasando el pulgar con fuerza sobre el parche para obtener un trémolo mixto.

CAPITULO XIV

Instrumentos musicales mecánico-eléctricos. — Instrumentos musicales radio-eléctricos. — Las Ondas Martenot. — El órgano eléctrico. — Instrumentos musicales que reproducen mecánicamente el sonido. — Grabación y reproducción mecánica del sonido. — El disco gramofónico de grabación eléctrica. — El alambre sonoro. — La película sonora. — El fotoliptófono.

116. INSTRUMENTOS MUSICALES MECANICO-ELECTRICOS. — La búsqueda de timbres nuevos y el deseo de remediar algunos defectos de los instrumentos corrientes ha tenido por consecuencia la creación de una nueva clase de instrumentos musicales, los *electrófonos* (párrafo 62), en los cuales interviene la electricidad de diversas maneras. Se los puede dividir en dos grandes grupos: *instrumentos mecánico-eléctricos* o *electromecánicos* e instrumentos puramente eléctricos, llamados más correctamente *instrumentos radioeléctricos*.

En los instrumentos musicales *mecánico-eléctricos*, el sonido es producido por los métodos mecánicos corrientes (fricción, percusión, etc.), siendo luego modificado eléctricamente; para esto es necesario transformar la energía sonora en energía eléctrica, pues es bajo esta forma que se producen las modificaciones, y luego efectuar la transformación contraria, de energía eléctrica a energía sonora [1].

En algunos instrumentos interviene la electricidad en forma accesoria, como es el caso de los órganos neumáticos actuales, que utilizan motores eléctricos para obtener el aire necesario y para facilitar la acción de los teclados, pero no por esto se los debe considerar como instrumentos mecánico-eléctricos.

Entre los principales instrumentos mecánico-eléctricos citaremos la guitarra eléctrica y el electrocordio. La *guitarra eléctrica*, utilizada con frecuencia en las orquestas populares, es una guitarra en que la

[1] Se llama micrófono todo aparato destinado a transformar energía sonora en energía eléctrica; se llaman auriculares y altoparlantes los aparatos destinados a realizar la transformación contraria, o sea de energía eléctrica a energía sonora. Cuando la intensidad de un sonido es demasiado pequeña se recurre a amplificadores. De todos estos aparatos existen diversos modelos cuyos detalles técnicos no estudiaremos por exceder los límites de la presente obra.

caja ha sido reducida al mínimo, y a la cual le ha sido agregado un micrófono situado encima del puente.

El *electrocordio* es un piano al cual se le agregan micrófonos pequeños situados sobre cada cuerda; éstos captan el sonido que produce la cuerda y lo modifican, pues según donde estén colocados refuerzan unos armónicos u otros.

Existen también instrumentos de viento y de percusión modificados con fines semejantes.

117. INSTRUMENTOS MUSICALES RADIOELECTRICOS. — Los instrumentos radioeléctricos son aquellos que producen sonidos mediante oscilaciones eléctricas en tubos electrónicos, modificándolos luego por medios también eléctricos. En los últimos años ha sido inventado un gran número de ellos, entre los cuales destacaremos el esferofón, el theremín, el trautonio, el hellertión y las ondas Martenot.

El *theremín* fué inventado por el ingeniero ruso cuyo nombre lleva este instrumento, en 1927. Consta de una caja de la cual salen dos antenas metálicas; aproximando a ellas las manos o alejándolas, se obtienen sonidos que se asemejan vagamente a la voz humana.

El *esferofón* posee tres teclados y una pedalera. Cada teclado posee un generador, por lo cual sólo puede oprimirse una tecla por vez. Es por lo tanto un instrumento de pocos recursos. Los trinos pueden ejecutarse mediante un mecanismo especial.

El *trautonio* y el *hellertión* tienen un generador por cada teclado; mediante una barra metálica permiten obtener una escala continua. El trautonio posee un solo teclado; permite la ejecución de glissandos y vibratos como si fuera un instrumento de cuerda. El hellertión posee cuatro teclados deslizantes y dos auxiliares para los pulgares, que facilitan el paso de un teclado a otro. Este instrumento es polifónico.

118. LAS ONDAS MARTENOT. — Este instrumento, inventado en 1922 por el violoncelista francés Maurice Martenot, consta de un aparato emisor de vibraciones eléctricas de alta frecuencia con varios circuitos que interfieren entre sí de manera predeterminada; las vibraciones procedentes de estas fuentes son captadas por un circuito receptor y amplificadas eléctricamente. La mano derecha actúa un teclado (monofónico), existiendo un dispositivo para glissandos; la mano izquierda controla la intensidad y el timbre de los sonidos producidos por el instrumento, mediante unos dispositivos similares a los de los registros del órgano.

La variedad de timbres que se obtienen mediante las ondas Martenot es grande; una de sus propiedades más valiosas, como observa acertadamente Henri Busser, es la de imitar el timbre de algunos instrumentos de la orquesta en tesituras adonde éstos no alcanzan. Posee, por otra parte, timbres de gran belleza que le son propios. Su extensión es aproximadamente de seis octavas.

119. EL ORGANO ELECTRICO. — El *órgano eléctrico*, de reciente invención (1935), es sin duda el más importante de los instrumentos puramente eléctricos. Difiere de los ya estudiados en que el sonido es producido electromagnéticamente en lugar de serlo por lámparas termoiónicas.

De las características del órgano neumático, conserva el órgano eléctrico la disposición en manuales y pedalera y el sistema de registros para obtener las variaciones de timbre, pero su técnica de ejecución es bastante diferente, y su timbre aunque bello, completamente distinto.

El sonido es obtenido mediante 91 generadores electromagnéticos consistentes en discos metálicos con pequeñas protuberancias que giran sobre un eje común a velocidad uniforme ante sendos imanes; sobre éstos, hay otras tantas bobinas en las que son inducidas corrientes eléctricas alternas debido a la variación de campo magnético provocada por el paso de las protuberancias. Las corrientes alternas así obtenidas tendrán una frecuencia de tantos ciclos como protuberancias pasen por segundo ante la bobina. Variando el número de éstas se obtendrán sonidos de diversas frecuencias.

Las variaciones de timbre de cada registro se obtienen agregando a cada fundamental los armónicos deseados, con la intensidad necesaria.

120. INSTRUMENTOS MUSICALES QUE REPRODUCEN MECANICAMENTE EL SONIDO. — Existen numerosos instrumentos que permiten reproducir mecánicamente el sonido mediante diversos procedimientos; por desgracia, el automatismo que rige sus reproducciones disminuye su valor artístico, estando además su capacidad de reproducción limitada a un repertorio previamente establecido. Citaremos de entre ellos el órgano mecánico, la pianola y la caja de música.

Esta última puede considerarse como un instrumento de varillas asimétricas punteadas; se compone de un cilindro metálico del cual se proyectan pequeñas púas y de una especie de peine formado por varillas de acero ordenadas según su longitud, cuyas frecuencias naturales forman una escala. Al girar el cilindro, movido por un mecanismo de relojería, las púas puntean las varillas produciendo una melodía, determinada previamente al colocar las púas sobre el cilindro.

121. GRABACION Y REPRODUCCION MECANICA DEL SONIDO. — La grabación del sonido y su posterior reproducción fueron durante mucho tiempo el sueño irrealizable de filósofos y hombres de ciencia. A principios del siglo XIX, el sabio inglés Tomás Young descubrió un procedimiento para inscribir las vibraciones del diapasón que fué el punto de partida para numerosas experiencias. En 1857, el inventor francés León Scott dió a conocer un aparato que llamó "phonautógrafo", que permitía inscribir las ondas sonoras, pero no concibió la posibilidad de que a partir de las inscripciones fuera po-

sible reproducir los sonidos inscriptos. Recién en 1877, el inventor norteamericano Tomás A. Edison construyó su *fonógrafo,* mediante el cual es posible inscribir el sonido y luego reproducirlo invirtiendo el proceso seguido para la inscripción.

Las partes esenciales del fonógrafo eran: la *bocina,* el *diafragma* unido al *punzón grabador* o a la *púa reproductora,* según el caso, y el *cilindro de cera* sobre el cual se efectuaba la grabación. Para realizarla, la bocina se colocaba en la dirección de las ondas sonoras; éstas, incidiendo sobre el diafragma, lo obligaban a realizar movimientos vibratorios que se comunicaban al punzón grabador, el cual trazaba los surcos de la grabación sobre la superficie del cilindro de cera. Éste realizaba un doble movimiento: de rotación sobre su eje longitudinal, y de traslación para que los surcos no se superpusieran. El surco trazado por el punzón grabador poseía paredes laterales rectas, estando la traza verdadera en el fondo del mismo.

El cilindro de cera ya grabado era utilizado para sacar copias, las que se hacían sobre cilindros de superficie más resistentes.

El procedimiento de reproducción era exactamente contrario al de grabación: el punzón grabador se reemplazaba por una púa, evitándose así el desgaste del cilindro.

A principios del siglo XX el cilindro de cera fué substituído por un disco plano que simplificaba el procedimiento de obtención de las copias; sobre éste, los surcos se grababan lateralmente, procedimiento que aportó ciertas ventajas con respecto al anterior. El fonógrafo modificado de esta manera fué llamado gramófono.

122. EL DISCO GRAMOFONICO DE GRABACION ELECTRICA. — El procedimiento de grabación inventado por Edison y adaptado posteriormente al gramófono, era puramente mecánico; substituyendo la bocina por un micrófono, se obtienen grabaciones más perfectas, pues la sensibilidad de éste es mucho mayor que la de la bocina. La reproducción se efectúa substituyendo la bocina por una combinación adecuada de amplificadores y altavoces.

La duración de un disco gramofónico de 30 cm. de diámetro, grabado con surco lateral a 78 revoluciones por minuto, es aproximadamente de cinco minutos, y de tres minutos para los de 25 cm.

Actualmente gozan de gran difusión los discos de "larga duración" que permiten obtener hasta 25 minutos de música sobre un disco de 30 cm. de diámetro. Esto se ha hecho posible volviendo al procedimiento primitivo de grabado en profundidad, perfeccionado por la utilización de punzones grabadores que trazan surcos de ancho pequeñísimo llamados "microsurcos" y por el grabado a velocidad reducida (33 ½ revoluciones por minuto). Este tipo de grabación permite evitar los cortes, antes inevitables en obras de cierta longitud.

Los procedimientos actuales de grabación son sumamente fieles, permitiendo captar sonidos cuya frecuencia sobrepasa los 12.000 ciclos. Conviene observar que es inútil poseer discos de gran fidelidad mientras el aparato reproductor no lo sea, pues se producen fenómenos de distorsión por los cuales se eliminan todos los sonidos cuyas frecuencias sobrepasan las posibilidades de este último.

123. EL ALAMBRE SONORO. — Este procedimiento de grabación fué inventado en 1900 por el ingeniero danés Waldemar Poulsen.

La teoría del alambre sonoro es sencilla: si un alambre de acero se desplaza con velocidad uniforme ante un imán de forma y potencia adecuadas, quedará imantado en todos sus puntos con la misma intensidad; si en lugar del imán se coloca un electroimán por el cual circulan las corrientes eléctricas provenientes de un micrófono, al variar la corriente microfónica de acuerdo con los sonidos captados, el electroimán imantará el alambre formando pequeños campos magnéticos de intensidad variable, respondiendo estas variaciones de intensidad a las variaciones de la energía sonora.

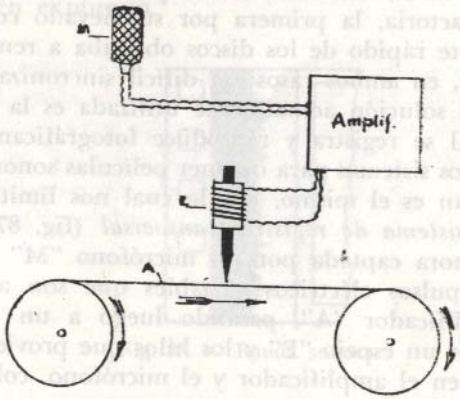


Fig. 86. — Esquema de grabación sobre alambre.

La figura 86 muestra en forma esquemática el mecanismo ideado por Poulsen: al pasar el alambre "A" ante la punta del núcleo de hierro del electroimán "E", en cada segundo se forman tantos campos magnéticos como ciclos posee la frecuencia del sonido que se graba. Si el alambre pasa ante el electroimán con una velocidad de 1 m/s, un sonido de 2000 ciclos producirá 2000 campos magnéticos que medirán: $\frac{1\ m}{2000} = 0{,}0005$ m.; para un sonido de 6000 ciclos la longitud de cada campo magnético sería 0,00016 m. Se comprende fácilmente que la punta del núcleo debe tener un ancho pequeñísimo para grabar sonidos de alta frecuencia, pues de ningún modo puede ser mayor que el campo magnético que debe producir.

Para reproducir el sonido basta invertir el proceso de grabación pasando el alambre imantado ante el electroimán, donde se genera

rán corrientes de intensidad variable que producirán ondas sonoras similares a las que originaron los campos magnéticos.

El alambre magnetizado conserva su imantación durante largos años; tiene además la ventaja de que se lo borra y puede utilizarse nuevamente, con sólo pasarlo ante un imán de campo magnético de intensidad constante, que puede ser el mismo electroimán cuando no está conectado con el micrófono. En los grabadores corrientes, el alambre se desplaza a 60 cms. por segundo y su longitud es tal que permite registrar cerca de una hora de música.

Existen actualmente modelos perfeccionados que utilizan una "cinta sonora", con lo cual se obtienen registros más fieles.

124. LA PELICULA SONORA. — Uno de los problemas más importantes que se presentaban al cinematógrafo en sus comienzos, era el silencio total en que transcurría la acción. Este problema se resolvía mediante el empleo de orquestas que ejecutaban la música de fondo necesaria, o más tarde, mediante discos, pero ninguna de las dos soluciones era satisfactoria, la primera por su elevado costo, la segunda porque el desgaste rápido de los discos obligaba a renovarlos constantemente; además, en ambos casos era difícil sincronizar la música con las imágenes. La solución actualmente utilizada es la película sonora, mediante la cual se registra y reproduce fotográficamente el sonido.

Existen varios sistemas para obtener películas sonoras, pero el principio que utilizan es el mismo, por lo cual nos limitaremos a describir el llamado *sistema de registro transversal* (fig. 87). En este sistema, la onda sonora captada por un micrófono "M" es transformada por éste en impulsos eléctricos variables que son amplificados mediante un amplificador "A", pasando luego a un *oscilógrafo*. Este está formado por un espejo "E" y los hilos que provienen del circuito al cual pertenecen el amplificador y el micrófono, colocados entre los

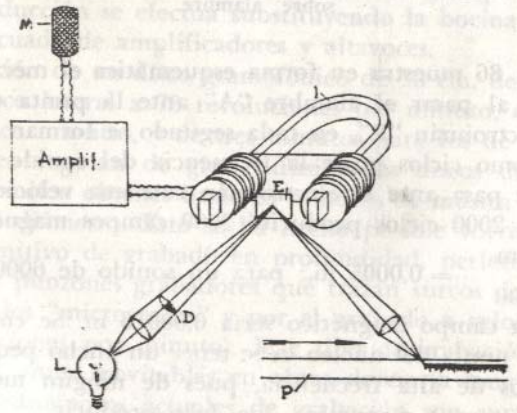


Fig. 87. — Esquema de grabación sobre película fotográfica.

polos de un poderoso imán en herradura "I". El espejo del oscilógrafo, oscila sincrónicamente con los impulsos eléctricos que pasan por el circuito. Cuando el espejo está en reposo, o sea que no pasan corrientes eléctricas por el circuito debido a que no inciden ondas sonoras sobre el micrófono, el rayo de luz procedente de la lámpara "L" se refleja sobre él de manera que luego de pasar a través de un diafragma apropiado "D" impresiona sólo la mitad del ancho de la película fotográfica "P" sobre la cual se efectúa el registro. Al incidir ondas sonoras sobre el micrófono, las corrientes eléctricas que en él se originan, obligan a oscilar al espejo del oscilógrafo y el rayo de luz que sobre éste incide, se refleja impresionando un mayor o menor ancho de película, la cual se desplaza a velocidad constante. De este modo se registra sobre la película fotográfica el rayo de luz cuyas oscilaciones están sincronizadas con las vibraciones sonoras.

La película impresionada de este modo se llama *banda sonora*. la figura 88 muestra un fragmento de banda sonora obtenido según el sistema recién explicado.

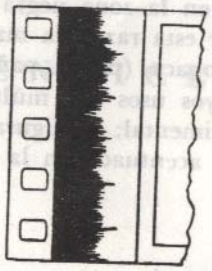


Fig. 88. — Banda sonora.

El registro del sonido puede hacerse al mismo tiempo que el de las imágenes, pero no es imprescindible; actualmente es corriente registrar simultáneamente la acción y los diálogos de los actores, registrándose en cambio separadamente la música, que luego se sincroniza con la acción.

Para reproducir el sonido, se invierte el proceso de registro, substituyendo el micrófono por un altoparlante y el oscilógrafo por una *célula fotoeléctrica*, aparato cuya resistencia al paso de la corriente eléctrica depende de la intensidad de la luz que sobre él incide.

125. EL FOTOLIPTOFONO. — El fotoliptófono es un sistema de registro y reproducción del sonido debido al inventor argentino Fernando Crudo Caamaño.

El registro del sonido se efectúa como en la película sonora, mediante un micrófono y un amplificador conectados a un oscilógrafo, sólo que en lugar de emplearse una película larga y estrecha, se realiza generalmente sobre hojas rectangulares de papel fotográfico (0,50 × × 0,40), en las cuales caben 150 metros de grabación, equivalentes a

tres minutos de ejecución. La velocidad a que se efectúa el registro es de 0,666 m/s, mayor que la de la película sonora, que es de 0,470 m/s; ésto aumenta su fidelidad.

La reproducción del sonido se logra en el fotoliptófono de la manera contraria a la que se utiliza en el cine sonoro; en efecto, ambos sistemas reproducen el sonido mediante una combinación de célula fotoeléctrica, amplificador y altoparlante, pero en la película sonora el haz luminoso que incide sobre la célula fotoeléctrica actúa por transparencia, mientras que en el fotoliptófono actúa por reflexión, ha-

Fig. 89. — Onda sonora registrada por un Fotoliptófono.

biendo absorción de luz en la zona negra del fonograma y reflexión en las zonas blancas. Por esta razón la materia sobre la cual se efectúa el registro debe ser opaca (papel, paño, etc.).

El fotoliptófono, cuyos usos son múltiples, es empleado exitosamente en fonética experimental; la figura 89 muestra el fonograma correspondiente a la "o" acentuada en la palabra "católico".

APENDICES

APENDICE I

ACUSTICA DE LAS SALAS.

Es conocido el hecho de que ciertas salas no son adecuadas para conferencias, pues la voz se apaga con extrema rapidez, mientras que en otras es imposible realizar conciertos sinfónicos porque la reverberación es excesiva, creando confusión; también sabemos que en una misma sala existen puntos donde la audición es particularmente clara y otros donde apenas puede escucharse lo que a distancia de 4 ó 5 filas es perfectamente audible.

Esta variación en el comportamiento de los diversos recintos o entre los varios puntos de una misma sala se estudia bajo el nombre de *Acústica de las Salas,* y de ella expondremos a continuación los conceptos esenciales.

Dos son los factores que influyen decisivamente en la acústica de una sala: la *reverberación,* controlada como veremos mediante superficies reflectoras de un poder absorbente adecuado, y la *forma de la sala,* para lo cual deberán tenerse en cuenta no sólo los paredes y el techo, sino los elementos decorativos y accesorios, como ser columnas, palcos, molduras, lámparas, etc.

Comencemos el estudio de la reverberación suponiendo una fuente sonora activa durante unos instantes en un recinto cerrado, y un oyente situado en la proximidad de la misma; aquél percibirá no sólo la onda directa, sino con cierto retardo, algunas ondas reflejas y por lo tanto un sonido más intenso que el que originaría la onda directa sola, pues ésta sólo aporta una fracción de la energía total emitida por la fuente. Si la fuente sonora emitiera ahora un sonido de intensidad constante durante un tiempo más o menos largo, la intensidad del sonido percibido por el oyente llegaría después de un tiempo a un nivel constante, permaneciendo en él mientras continuara la emisión de sonido en la fuente; al cesar ésta, la intensidad decaería nuevamente hasta llegar al silencio. Es evidente que el nivel se mantendrá constante cuando se haya alcanzado un equilibrio entre la energía emitida y la energía perdida por absorción.

La figura 90 representa gráficamente el fenómeno recién estudiado: el eje de abscisas corresponde a los tiempos y el de ordenadas a las intensidades. Obsérvese que la intensidad del sonido crece desde "0" hasta "t_1"; desde "t_1" hasta "t_2" la intensidad se mantiene constante, y desde "t_2" en adelante decrece constantemente (t_1 corresponde al momento en que el sonido cesa en la fuente. La curva descripta por la intensidad desde t_2 en adelante es de gran importancia, pues representa el tiempo que tarda en apagarse el sonido en la sala a partir del instante en que cesa en la fuente: si este lapso de tiempo es

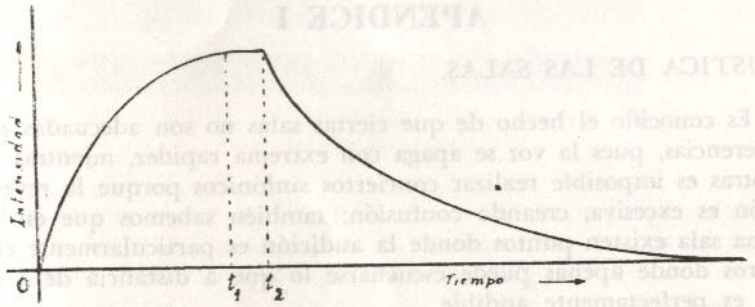


Fig. 90. — Reverberación.

demasiado grande, se dice que la sala tiene una reverberación excesiva, mientras que si es demasiado pequeño la sala será "sorda", lo cual constituye también una falla.

Se ha convenido en llamar *tiempo de reverberación* el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido determinado se reduzca a un millonésimo del valor inicial, a partir del instante en que cesa en la fuente. Puede decirse que *el tiempo de reverberación es el tiempo necesario para que un sonido perfectamente audible, como por ejemplo un aplauso o un grito brusco, deje de escucharse.*

No siempre se llega al equilibrio entre la energía producida y la energía absorbida, pues los sonidos no son prolongados suficientemente. El gráfico, en este caso, constaría de las dos curvas antes citadas sin el trazo recto intermedio.

La reverberación de un ambiente puede siempre controlarse, mediante el empleo de superficies reflectoras de un poder absorbente adecuado. Debe tenerse en cuenta que una sala vacía tiene un tiempo de reverberación mucho mayor que cuando está llena, por lo cual es costumbre tomar un valor medio entre ambas condiciones.

La fórmula de Sabine: $t = 0{,}05 . V/A$ vincula el tiempo de reverberación "t" de una sala, con su volumen "V" (dado en pies cúbicos), y el poder absorbente de sus superficies reflectoras "A". Puede verse en la fórmula de Sabine y la experiencia lo confirma, que *el tiempo de reverberación aumenta con el volumen de la sala;* para que se mantenga entre límites convenientes es necesario por lo tanto aumentar "A". Utilizando esta fórmula, puede controlarse el tiempo de reverberación de una sala con toda facilidad mediante revestimientos y tapizados con un poder absorbente apropiado. El tiempo de reverberación puede determinarse experimentalmente, utilizando aparatos que no es el caso de describir.

Para terminar nuestras consideraciones sobre la reverberación debemos hacer notar que cada sala tiene una o más frecuencias en que la absorción es mínima; un conferencista experimentado adapta instintivamente el tono de su voz a una de estas frecuencias, con lo cual obtiene mayor sonoridad con el mismo esfuerzo. Las mujeres se cansan más al hablar en público que los hombres, pues la absorción de las frecuencias elevadas que utilizan es mayor, pero en cambio pueden hablar claramente con mayor rapidez, debido a que el tiempo de reverberación de dichos sonidos es menor.

Por lo que respecta a la forma de la sala, deben evitarse en lo posible dos grandes defectos: en primer lugar, la existencia de zonas donde la intensidad del sonido es anormal, llamadas *zonas de convergencia* cuando la intensidad es excesiva, y *zonas de sombra acústica* cuando es insuficiente; y en segundo lugar, que la diferencia entre el camino recorrido por la onda directa y las ondas reflejas no sea demasiado grande, pues el retraso con que el oyente oiría las segundas con respecto a la primera sería perjudicial para la audición.

La fuente sonora no debe estar cerca de superficies de curvatura marcada, pues en la proximidad de éstas se producen convergencias que engañan al ejecutante sobre la intensidad con que se lo escucha. Cuando el escenario es semicircular, es particularmente necesario evitar que la fuente sonora ocupe el centro del semicírculo; en estos casos, es costumbre, además, disponer a corta distancia de los ejecutantes superficies reflectoras laterales, las que deberán ser de madera o de otra substancia cualquiera de bajo poder absorbente, pero no telas ni materiales muy absorbentes que darían lugar a la ilusión contraria, o sea la de escasa intensidad. Los pequeños grupos de ejecutantes (música de cámara en general), deben por lo tanto, colocarse más bien distantes de las superficies reflectoras.

Es evidente que por bien construída que esté una sala desde el punto de vista acústico, habrá zonas en las cuales la audición será siempre inferior: el fondo y los costados. Esto se corrige actualmente con altoparlantes. Debe evitarse que las ondas que procedan de éstos sean vueltas a captar por el micrófono; este fenómeno, conocido con el nombre de "acoplamiento", puede dañar seriamente la instalación. Se lo evita colocando los altoparlantes más adelante que el micrófono y eligiendo a éste de modo que sea sensible sólo a los sonidos que le llegan en una dirección.

APENDICE II

ANATOMIA Y FISIOLOGIA DEL OIDO.

Para describir anatómicamente el oído, es costumbre dividirlo en tres partes llamadas respectivamente: oído externo, oído medio y oído interno. Las dos primeras tienen por función captar y trasmitir al oído interno las ondas sonoras, siendo éste el verdadero órgano de la audición. La figura 91 muestra un corte del oído con la nomenclatura de sus partes principales.

El *oído externo* comprende dos partes: el *pabellón de la oreja* y el *conducto auditivo externo.* Este tiene forma aproximadamente cilíndrica y finaliza en la membrana del tímpano.

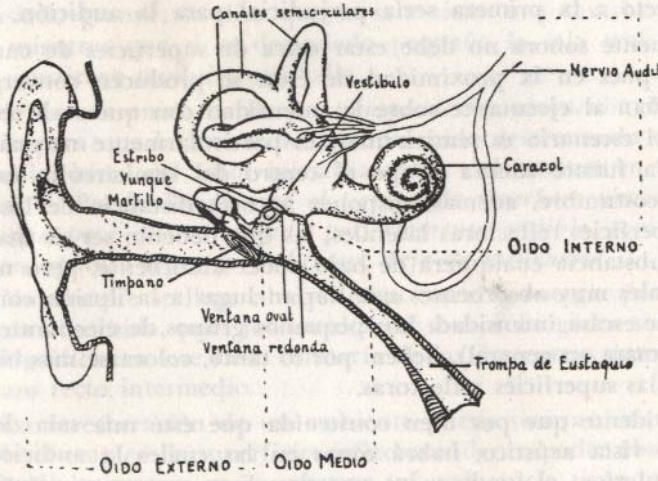


Fig. 91. — Aparato auditivo.

El *oído medio* es una cavidad llena de aire situada en el interior del hueso temporal; su forma es bastante irregular y su volumen oscila entre uno y dos cm³. La pared externa del oído medio está constituída casi enteramente por el *tímpano,* que cierra el conducto auditivo externo. En la pared interna del oído medio, que separa a éste del oído interno, se encuentran dos aberturas: la *ventana oval* y la *ventana redonda,* llamadas así por sus formas respectivas.

En el interior de la caja timpánica se encuentran tres huesecillos llamados *martillo, yunque* y *estribo;* están dispuestos en cadena, apoyando el mango del martillo sobre la cara interna del tímpano y la base del estribo sobre la ventana oval. El oído medio comunica con la parte superior de la faringe mediante un conducto bastante largo llamado *trompa de Eustaquio,* cuya función es doble: dar paso a las secreciones de la mucosa timpánica y comunicar el aire exterior con el aire que contiene el oído medio, igualando así las presiones que soporta de cada lado el tímpano; se abre al deglutir, normalizando así la presión en cada instante.

La sede verdadera del sentido de la audición es el *oído interno,* llamado también *laberinto* por su forma complicada; está situado detrás del oído medio en la porción petrosa del hueso temporal. Consta de dos partes: una serie de cavidades excavadas en el espesor del peñasco llamada *laberinto óseo,* y dentro de éste, otra serie de cavidades llamadas *laberinto membranoso,* pues sus paredes son blandas.

Las cavidades del laberinto membranoso contienen un líquido llamado *endolinfa.* Rodeando el laberinto membranoso, se halla otro líquido llamado *perilinfa,* que ocupa los espacios libres entre las paredes internas del laberinto óseo y las paredes externas del laberinto membranoso.

El laberinto óseo comprende tres partes: el vestíbulo, los canales semicirculares y el caracol. El *vestíbulo* es una cavidad situada detrás del oído medio; sus paredes están perforadas por numerosos orificios; unos comunican con los canales semicirculares y el caracol, y otros con el oído medio. El acueducto vestibular permite una salida parcial a los líquidos linfáticos cuando la presión que experimentan es excesiva.

Los *canales semicirculares,* en número de tres, desempeñan un papel de escasa importancia en la audición, estando relacionados principalmente con las sensaciones de equilibrio.

El *caracol* es la parte esencial del órgano de la audición. Puede considerarse como un tubo enrollado en espiral que describe dos vueltas y media desde la base hasta el vértice. En el interior del caracol existe una *lámina espiral* que lo recorre desde el vértice hasta la base; la lámina espiral no abarca todo el ancho del tubo del caracol, sino que posee un borde libre de donde arrancan dos membranas que llegando hasta la pared opuesta forman tres divisiones en el tubo del caracol. Queda éste, por lo tanto, dividido en tres compartimentos: compartimento superior llamado *rampa vestibular,* compartimento medio y compartimento inferior llamado *rampa timpánica.* La membrana que separa el compartimento medio de la rampa vestibular se llama *membrana de Reissner,* y la que separa el compartimento medio de la

rampa timpánica se llama *membrana basilar*. En la figura 92, que muestra un corte transversal del caracol, pueden verse las partes mencionadas.

La rampa vestibular comunica directamente con el vestíbulo, mientras que la rampa timpánica conduce a la ventana redonda, cerrada por una pequeña membrana llamada tímpano secundario. En el vértice del caracol existe una pequeña comunicación entre ambas rampas, llamada *helicotrema*.

El *laberinto membranoso* contenido dentro del laberinto óseo, comprende como él tres partes: vestíbulo membranoso, canales semicirculares membranosos y caracol membranoso. El vestíbulo membranoso comprende dos vesículas llamadas *utrículo* y *sáculo*, que se comunican mediante el conducto endolinfático. El caracol membranoso consiste en un tubo largo llamado *conducto coclear*, que recorre todo el compartimento medio del caracol; se origina como saco cerrado cerca de la base del vestíbulo y termina del mismo modo al llegar al

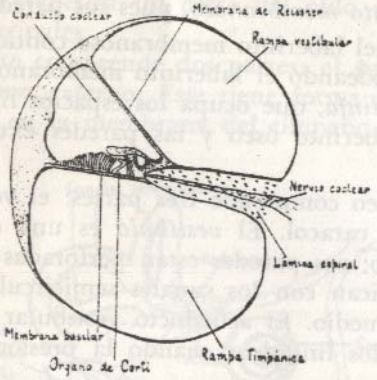


Fig. 92. — Corte transversal del caracol.

helicotrema. La estructura del conducto coclear es complicadísima: su parte más importante es el *órgano de Corti*, que comprende dos series de pilares que descansan sobre la membrana basilar formando los *arcos de Corti*.

El oído está innervado por el nervio auditivo, que se divide en dos ramas principales: rama vestibular y rama coclear. La rama coclear penetra en el caracol por su base y termina en los pilares internos de las arcadas del órgano de Corti. La rama vestibular del nervio auditivo innerva las partes restantes del oído interno.

Las ondas sonoras captadas por el oído externo llegan al oído interno por tres vías. En la primera, que es la principal, la trasmisión del sonido se efectúa a través del tímpano y la cadena de huesecillos.

La segunda utiliza también el tímpano, pero no los huesecillos, sino que las vibraciones del tímpano se propagan en el aire del oído medio incidiendo sobre la membrana que cierra la ventana redonda, con lo cual el sonido penetra al oído interno por la rampa timpánica en lugar de hacerlo por la vía normal de la rampa vestibular. El tercer camino no utiliza el tímpano, sino que la trasmisión se realiza por vía ósea directamente a través de los huesos del cráneo al líquido del oído interno.

El laberinto óseo, excavado en la porción petrosa del temporal, es una cavidad de paredes rígidas, salvo en dos puntos: la ventana oval y la ventana redonda. Los líquidos que contiene forman dos sistemas: la endolinfa contenida en el laberinto membranoso de paredes blandas y la perilinfa que rodea a éste llenando totalmente las cavidades del laberinto óseo.

El estribo al vibrar, ejerce presión sobre los líquidos del oído interno, que se manifiesta sobre el caracol membranoso y la membrana que cierra la ventana redonda. Al ceder esta membrana se originan movimientos en el seno de la masa líquida, y debido a la viscosidad e impedancia de ésta, presiones interiores en el seno de la misma; estas presiones se ejercen sobre la membrana de Reissner y a través de ella y de la endolinfa que llena el conducto coclear, sobre la membrana basilar.

Las perturbaciones sufridas por la membrana basilar son transformadas por el órgano de Corti en impulsos eléctricos, que llevados al cerebro por el nervio auditivo, se convierten en sonido.

---

[1] Suele decirse que los huesecillos del oído medio son cuatro, pues se considera erróneamente como un cuarto hueso (hueso lenticular) la apófisis lenticular del yunque, que se separa de éste con gran facilidad por estar unida a él mediante un itsmo óseo muy frágil.

APENDICE III

HALLAR EL NUMERO DE VECES QUE LA COMA SINTONICA ESTA CONTENIDA EN EL TONO GRADE Y EN EL TONO PEQUEÑO.

Recordando lo estudiado en el párrafo 48, vemos que el problema de calcular las veces que el intervalo A representado por la fracción m/n contiene al intervalo B representado por la fracción p/q, se reduce a calcular "x" en la expresión:

$$(p/q)^x = m/n$$

Para esto será necesario tomar logaritmos:

$$x \cdot \log (p/q) = \log (m/n)$$

Pasando términos tendremos:

$$x = \frac{\log (m/n)}{\log (p/q)} = \frac{\log m - \log n}{\log p - \log q}; \quad (I)$$

Los datos de nuestro problema son:

Tono grande = A; representado por 9/8.
Coma sintónica = B; representado por 81/80.
Por lo tanto: m = 9; n = 8; p = 81; q = 80.

Si reemplazamos estos datos en (I), obtendremos:

$$x = \frac{\log 9 - \log 8}{\log 81 - \log 80} = \frac{0{,}95424 - 0{,}90309}{1{,}90849 - 1{,}90309} = \frac{0{,}05115}{0{,}00540} = 9{,}4725;$$

por lo tanto, *la coma sintónica cabe aproximadamente nueve veces y media en el tono grande.*

Si repetimos el cálculo para el tono pequeño, obtendremos:

$$x = \frac{\log 10 - \log 9}{\log 81 - \log 80} = \frac{1 - 0{,}95424}{0{,}00540} = \frac{0{,}04576}{0{,}00540} = 8{,}4745.$$

APENDICE IV

DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO.

Uno de los métodos más sencillos para determinar la velocidad del sonido, se basa sobre la resonancia. Para determinar la velocidad del sonido según este método se procede de la siguiente manera: se toman un diapasón de frecuencia conocida y una probeta; ésta contendrá una cantidad de agua, variada mediante otro recipiente con el que comunica por la base mediante un tubo flexible.

Excitando el diapasón ante la boca de la probeta mientras se varía el nivel del agua en su interior, podrá observarse que para un nivel dado se produce una marcada resonancia (véase el párrafo 25) entre el diapasón y la columna de aire contenida en la probeta; ésta se comporta como un tubo cerrado (véase el párrafo 85), formándose un nodo en la superficie del agua y un vientre en el extremo abierto. La distancia entre el nivel del agua y la boca del tubo equivaldrá en dicho momento a $\lambda/4$, bastando efectuar su medición para conocer λ mediante una simple multiplicación. Como sabemos que $v = \lambda . n$ ("v" es la velocidad del sonido y "n" su frecuencia) y conocíamos "n" de antemano, efectuando el producto indicado, se habrá determinado la velocidad del sonido.

Para mayor precisión podrán tomarse dos niveles diferentes, correspondientes a $\lambda/4$ y $3\lambda/4$ y obtener λ a partir de la diferencia entre ellos que será $3\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda/2$. Pueden hacerse además las correcciones de longitud y de temperatura.

Operando con un diapasón que dé el LA_4 de 440 ciclos, deberá tomarse una probeta de más de 65 cms. de longitud pues $\lambda/4$ para dicho sonido mide aproximadamente 58 cms.

APENDICE V

INSTRUMENTOS TRANSPOSITORES.

Se dice que un instrumento es transpositor cuando la música a él destinada se escribe habitualmente de un modo tal que en cada instante exista un intervalo fijo "x" entre el texto leído por el ejecutante y los sonidos emitidos por el instrumento. Obsérvese que la cualidad de transpositor *no es propia* del instrumento mismo, sino que le es conferida por el uso adoptado respecto de su notación: nada impide, y es frecuente hacerlo, escribir para un instrumento transpositor del mismo modo que para los demás, o sea, tal como suena. Por esta razón creemos que debiera decirse, por ejemplo: el corno inglés y la trompa se escriben habitualmente como instrumentos transpositores y no, el corno inglés y la trompa son instrumentos transpositores.

Todos los instrumentos transpositores son instrumentos de viento, siendo este grupo instrumental el que ha dado origen a la práctica de la escritura transpuesta. En efecto, cada familia de instrumentos de viento posee su digitación propia que se mantiene casi sin variantes en sus diversos miembros y por esta razón, es muy ventajoso para el ejecutante reducir *mediante la notación,* los instrumentos de una familia a un instrumento tipo no transpositor sobre el cual se basa la digitación, pues gracias a este artificio, al conocer cualquiera de los instrumentos de una familia, puede pasar con poquísima dificultad a los demás.

El instrumento tipo no transpositor puede existir como en el caso del oboe con respecto del corno inglés, haber caído en desuso como el clarinete en DO, o no haber existido nunca como la trompa de DO (agudo).

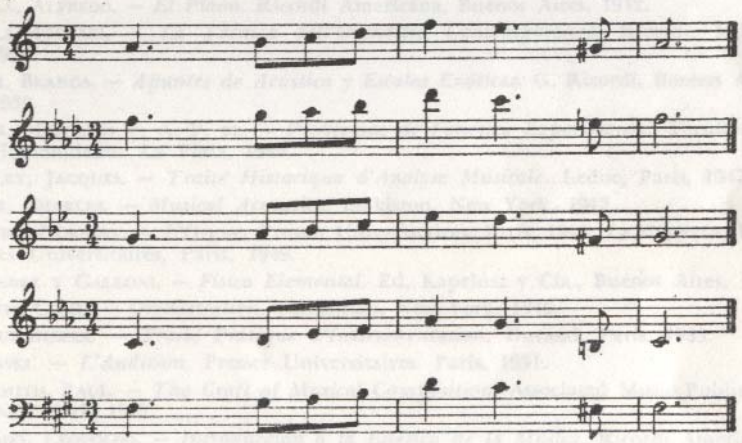
Los instrumentos transpositores se designan por convención agregando a su nombre las expresiones "en La", en "Fa", etc.; el intervalo formado por la nota DO y la nota nombrada en las expresiones arriba indicadas será el intervalo al cual transporta el instrumento, correspondiendo lógicamente a la relación de éste con el instrumento tipo.

Si la relación entre el instrumento tipo y el instrumento transpositor fuera de octava, se dirá "en Do". En la mayoría de los instrumentos, el transporte es descendente, pero también hay instrumentos como los clarinetes pequeños en Mib y LAb, y la pequeña trompeta en Re, que transportan hacia arriba.

Puede ocurrir que dos o más instrumentos transpositores de una misma familia se hallen a distancia de octava uno de otro; en este caso es necesario indicar también su tesitura: saxófono contralto en Mib; saxófono barítono en Mib; clarinete (soprano) en La; clarinete bajo en La (obsérvese que se llama clarinete bajo a un instrumento que por su tesitura con relación a la del instrumento tipo debiera llamarse clarinete tenor).

Para ilustrar lo que antecede, obsérvese el ejemplo 93: el pasaje 93-a, ejecutado sobre un clarinete pequeño en LAb se convertirá en 93-b; sobre un clarinete en SIb (soprano), en 93-c; sobre un clarinete contralto en MIb, en 93-d; sobre un clarinete bajo en LA en 93-e.

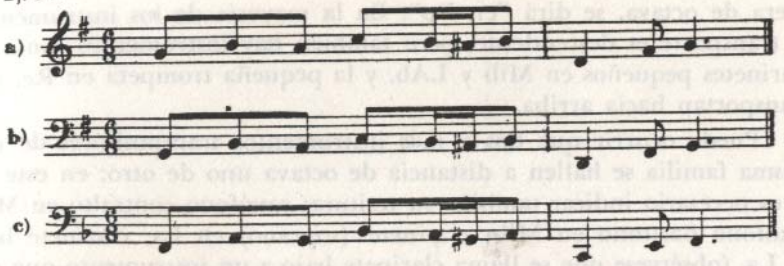
Ej. 93



Es evidente que el ejecutante sólo debe estudiar un solo pasaje (93-a) si utiliza la escritura transpuesta; de igual modo, el compositor que conoce las posibilidades del instrumento tipo, conocerá las de todos los de la familia.

Cuando el intervalo a que transporta el instrumento es grande, suele escribírselo cambiando la clave para disminuir la distancia entre lo escrito y su efecto; los pasajes 94-a y 94-b, corresponden a un mismo pasaje (94-c), ejecutado sobre un saxófono bajo en SIb. El primer tipo de escritura es conveniente para los ejecutantes y el segundo da una noción más clara sobre la altura real del pasaje.

Ej. 94



Es muy frecuente en la actualidad, simplificar en lo posible las partituras, reservando la escritura transpuesta a las partes destinadas a los ejecutantes.

BIBLIOGRAFIA

APEL, WILLY. — *Harvard Dictionary of Music*. Harvard University Press, Cambridge, 1944.

BELOU, PEDRO. — *Atlas de Anatomía del Organo del Oído*. Est. Gráficos Oceana, Buenos Aires, 1932.

BOUASSE, H. — *Cordes et Membranes*. Delagrave, París, 1929; *Instruments à Vent* (2 tomos). Delagrave, París, 1926.

BOZZOLO, DANTE. — *El Problema de la Afinación en el Violín*.

CASELLA, ALFREDO. — *El Piano*. Ricordi Americana, Buenos Aires, 1942.

CASELLA-MORTARI. — *La Tecnica dell'Orchestra Contemporanea*. Ricordi, Milano, 1950.

CATTOI, BLANCA. — *Apuntes de Acústica y Escalas Exóticas*. G. Ricordi, Buenos Aires, 1939.

CHAVES, MERCEDES V. A. P. DE. — *Problemas de Fonética Experimental*. Facultad de Humanidades, La Plata, 1948.

CHAILLEY, JACQUES. — *Traité Historique d'Analyse Musicale*. Leduc, París, 1947.

CULVER, CHARLES. — *Musical Acoustics*. Blakiston, New York, 1947.

DUFOURQ, NORBERT. — *L'Orgue*. Presses Universitaires. París, 1948; *Le Clavecin*. Presses Universitaires, París, 1949.

FERNÁNDEZ Y GALLONI. — *Física Elemental*. Ed. Kapelusz y Cía., Buenos Aires, 1941.

FORSYTH, CECIL. — *Orchestration*. Macmillan, New York, 1946.

GUIRAUD-BUSSER. — *Traité Pratique d'Instrumentation*. Durand, París, 1933.

GRIBENSKI. — *L'Audition*. Presses Universitaires. París, 1951.

HINDEMITH, PAUL. — *The Craft of Musical Composition*. Associated Music Publishers, New York, 1942.

HURTADO, LEOPOLDO. — *Introducción a la Estética de la Música*. Ricordi Americana, Buenos Aires, 1952.

ISNARDI-COLLO. — *Física*. Imprenta de la Escuela Naval. Río Santiago, 1943.

JEANS, JAMES. — *Ciencia y Música*. Ediciones Agora, Barcelona, 1946.

LAVIGNAC, ALBERT. — *Encyclopédie de la Musique*. Delagrave, París, 1925.

KOECHLIN, CHARLES. — *Les Instruments à Vent*. Presses Universitaires, París, 1948.

MARTIN, CONSTANT. — *La Musique Electronique*. Technique et Vulgarisation, París, 1950.

MARTIN, G. — *Sonido*. Librería "El Ateneo", Buenos Aires, 1940.

MATRAS, J. J. — *L'Acoustique Appliquée*. Presses Universitaires, París, 1949; *Le Son*. Presses Universitaires, París, 1948.

OLSON, HARRY F. — *Musical Engineering*. Mc Graw-Hill, New York, 1952.

PINCHERLE, MARC. — *Les Instruments du Quatuor*. Presses Universitaires, París, 1948.

PRELAT, CARLOS. — *El mundo de las vibraciones y de los sonidos*. Espasa-Calpe, Buenos Aires, 1952.

RIGHINI, PIETRO. — *Acustica Musicale*. Libreria Tecnica Editrice V. Giorgio, Turin, 1942.

REDFIELD, JOHN. — *Music, a Science and an Art*. Knopf, New York, 1941.

SACHS, CURT. — *Historia de los Instrumentos Musicales*. Centurión, Buenos Aires, 1947; *The Rise of Music in the Ancient World*. Norton & Co., New York, 1943.

SEASHORE, CARL. — *Psychology of Music*. McGraw-Hill, New York, 1938.

SCHOEN, MAX. — *The Psychology of Music*. The Ronald Press Company, New York, 1940.

STEVENS and DAVIS. — *Hearing*. John Wiley, New York, 1938.

TESTUT Y LATARJET. — *Anatomia descriptiva*. Editorial Salvat, Buenos Aires, 1938.

TORRE BERTUCCI, JOSÉ. — *Apuntes de Clase*.

VOLBACH, FRITZ. — *La orquesta moderna*. Editorial Labor, Buenos Aires, 1932.

YASSER, JOSEPH. — *A Theory of Evolving Tonality*. American Library of Musicology, New York, 1932.

WHITE, HARVEY. — *Classical and Modern Physics*. Van Nostrand, New York, 1940.

WOOD, ALEX. — *The Physical Basis of Music*. Cambridge University Press, Cambridge, 1925.