Inmaculada Báez Sánchez

Aproximación a la Acústica Musical

Ediciones Si bemol

TEMA I: INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA

1. Breve reseña histórica

Actualmente se designa Acústica musical a un conjunto bastante heterogéneo de conocimientos científicos sobre la física del sonido y diversos aspectos técnicos del arte musical.

Desde tiempos inmemoriales, ha existido una preocupación por conocer las leyes que rigen el sonido.

En los albores de la filosofía griega, encontramos a PITÁGORAS (582-500 a. C.), quien comienza a realizar las primeras experiencias científicas sobre el sonido junto con sus discípulos (como Euclides, Eratóstenes y Ptolomeo). Estos filósofos encontraban en las relaciones entre las longitudes de las cuerdas y los intervalos armónicos más sencillos, la base para muchas especulaciones.

> *Pitágoras advirtió que las cuerdas vibrantes producen tonos armónicos cuando las proporciones de las longitudes de las cuerdas son números enteros, y que estas proporciones podían ser extendidas a otros instrumentos. De hecho Pitágoras hizo destacables contribuciones a la teoría matemática de la música. Fue un músico experto, tocaba la lira, y usó la musica como un medio para ayudar a los enfermos.*
>
> Ruiz Aznar, E. (2007)

Las teorías pitagóricas, ampliadas con las aportaciones de ARISTÓGENES Y ARISTÓTELES, pasaron a los romanos prácticamente sin cambios.

Uno de los instrumentos más famoso fue el Monocordio: es un instrumento largo en forma de flauta larga interiormente cóncava con aberturas, dividida en nueve partes grabadas con nueve letras del alfabeto, de arriba abajo. Sobre las divisiones tiene una única cuerda, que si se la percute mediante una pluma o madera con la mano izquierda, permite ejecutar todas las melodías inventadas.

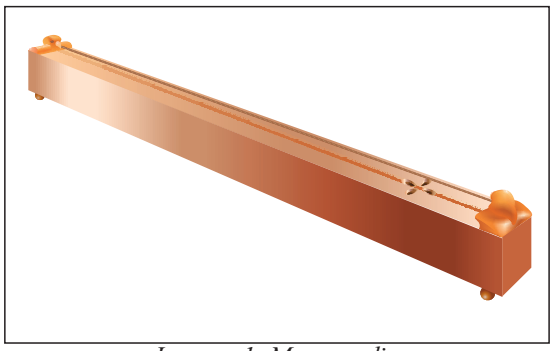

Imagen 1. Monocordio

> **¿Sabías que?...El monocordio era un instrumento que llevaban casi todos los instrumentistas cultos** *y los utilizados en la enseñanza de la habilidad musical. Boecio (fol. 162, col. 3), fue el primero que describió las investigaciones llevadas a cabo con él.*

 Prohibida su reproducción

1.2.2. Magnitudes de tiempo: Período, Fase, Tiempo de la Amplitud y Frecuencia.

Período (τ): es el tiempo transcurrido entre dos pasadas consecutivas por el mismo punto en el mismo sentido. **Es el tiempo del Ciclo,** y se mide en segundos.

En una onda mecánica coincide con el tiempo que tarda una partícula en realizar una oscilación completa. **En el Sistema Internacional el período se expresa en segundos y se simboliza por la letra T.**

Fase (ϕ): es el tiempo necesario para que el cuerpo se desplace desde la posición de equilibrio hasta una posición cualquiera de su trayectoria (o viceversa) por el camino más corto. **Es una magnitud variable,** como la elongación, **y se mide es segundos.** Se emplea la letra griega "Φ" (phi).

Tiempo de Amplitud: es el tiempo que tarda el cuerpo en ir desde la posición de reposo a cada uno de los extremos.

Frecuencia (f ó n): es el número de veces que el cuerpo pasa por una misma posición en el mismo sentido en la unidad de tiempo. En el Sistema Internacional se mide en ciclos por segundo o en 1/s (s-1) o Herzios1 (Hz). Se representa con la letra f o con la letra griega v (nu).

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

De esta forma y por ejemplo, si una partícula realiza 8 vibraciones completas en un segundo, la frecuencia será de 8 Hz y el período será entonces de 1/8 de segundo.

Las frecuencias de los objetos oscilantes abarcan una amplísima gama de valores. Los temblores de los terremotos pueden tener una frecuencia inferior a 1, mientras que las veloces oscilaciones electromagnéticas de los rayos gamma pueden tener frecuencias de 1020 o más.

En casi todas las formas de vibración mecánica existe una relación entre la frecuencia y las dimensiones físicas del objeto que vibra. Por ejemplo, el tiempo que necesita un péndulo para realizar una oscilación completa depende en parte de la longitud del péndulo; la frecuencia de vibración de la cuerda de un instrumento musical está determinada en parte por la longitud de la cuerda. En general, cuanto más corto es el objeto, mayor es la frecuencia de vibración.

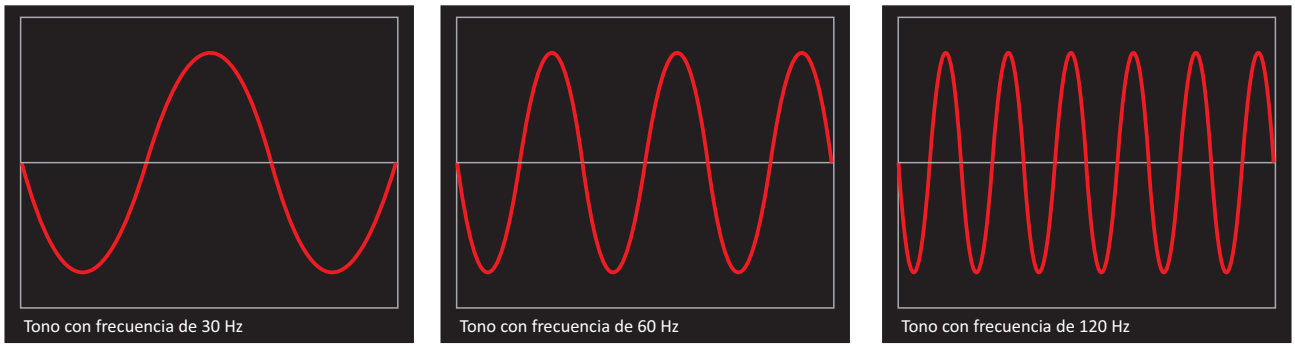

Imagen 12. Ejemplos de un tono en frecuencias 30, 60 y 120 Hz.

Podemos utilizar cualquier Apps para comprobar que el tono generado a 30 Hz., multiplicado por dos, nos emite su octava justa aguda (60 Hz.) y, nuevamente, duplicada su frecuencia, volvemos a escuchar el mismo tono otra octava más aguda (a 120 Hz.).

 Prohibida su reproducción

TEMA III: MOVIMIENTO ONDULATORIO

1. Tipos de movimiento ondulatorio

Un movimiento ondulatorio se produce cuando un movimiento vibratorio se propaga en un medio elástico.

ONDA es la vibración periódica del medio, sea cual fuere la causa de la vibración. Se propaga desde el centro de la perturbación y su velocidad depende de las características del medio y la naturaleza de la onda. **Se produce una onda cada vez que el fenómeno se propaga por un medio material sin que haya por ello desplazamiento de la materia**. Ej.: Objeto cayendo sobre la superficie del agua.

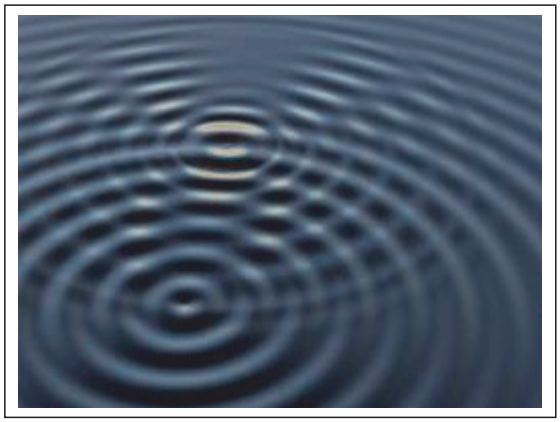

Imagen 29. Movimiento ondulatorio en el agua

□ ONDA LONGITUDINAL o MOVIMIENTO ONDULATORIO LONGITUDINAL

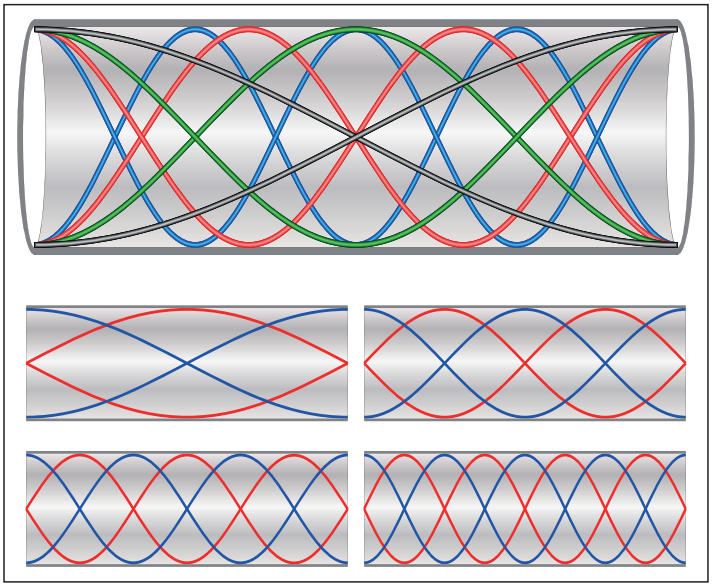

Imagen 30. Producción de armónicos en las cuerdas (ondas transversales)

En los tubos, para comprender una onda longitudinal, imaginamos que obligamos a un émbolo (situado en un extremo) a efectuar un movimiento armónico simple paralelo a la dirección del tubo. En cada oscilación se forman condensaciones o compresiones (mayor presión que en equilibrio) y rarefacciones o dilataciones (con presión inferior a la de equilibrio). Cada partícula realiza movimiento Armónico simple paralelo a la dirección de propagación.

La longitud de onda (λ) sería la distancia entre dos condensaciones o dos enrarecimientos sucesivos.

 Prohibida su reproducción

TEMA V: EL PROCESO DE AUDICIÓN: EL OÍDO

1. Anatomía del oído humano

La otorrinolaringología es la ciencia que estudia el órgano del oído, la audición y todos los problemas que de los mismos se derivan.

El oído es un órgano conformado de tres partes: el Oído externo, el Oído medio y el Oído interno.

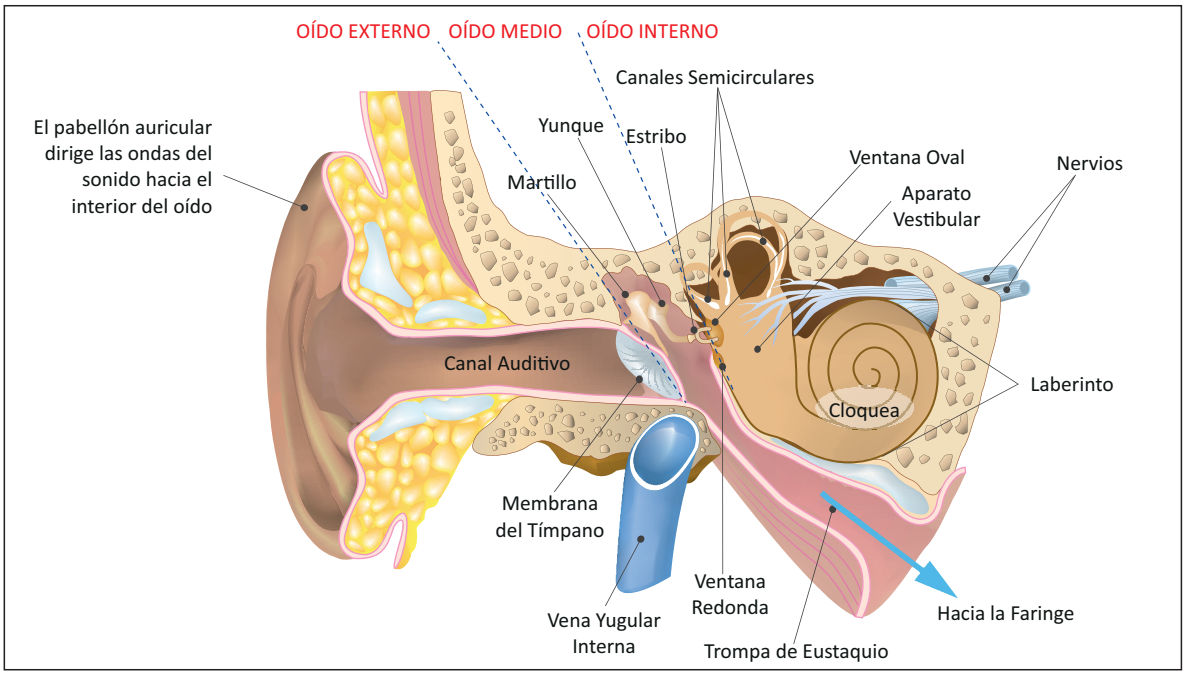

Imagen 45. El aparato auditivo

Las dos primeras partes -oído externo y medio- son las encargadas de recoger las ondas sonoras para conducirlas al oído interno y excitar una vez aquí a los receptores de origen del nervio auditivo.

<u>El oído externo:</u>

Comprende dos partes: el **Pabellón** y el **Conducto Auditivo Externo**.

<u>El oído medio:</u>

Está formado por un conjunto de cavidades llenas de aire, en las que se considera tres importantes porciones: la **Caja del Tímpano** conformada por tres huesecillos (***Martillo, Yunque, Estribo***), la **Trompa de Eustaquio** íntimamente relacionada con las vías aéreas superiores (rinofaringe).

<u>El oído interno:</u>

También tiene su complejidad y está comprendido por el **Laberinto óseo y membranoso.** De este último nacen las vías nerviosas acústicas y vestibulares.

El Laberinto, cuya función principal es la de mantener la orientación espacial y el equilibrio estático y dinámico del individuo, consta de tres partes: el ***Vestíbulo,*** los ***Conductos*** semicirculares y el ***Caracol.***

Las cavidades del **Laberinto** están llenas de ***líquido endótico*** (endolinfa y perilinfa), que al movilizar las distintas membranas estimulan las ***Células ciliadas internas y externas.***

 Prohibida su reproducción

Una vez conocida la relación de cualquier grado con respecto al primero, queda averiguar, cuál es la distancia que hay entre cada uno de ellos.

Para averiguar RE – MI = Utilizamos 3ª Mayor – Tono = $\frac{81}{64} - \frac{9}{8} = \frac{648}{576} = \frac{9}{8}$ al reducirlo por 72

(DO-MI) - (DO-RE)

Para averiguar FA-SOL = Utilizamos 5ª J – 4ª Justa = $\frac{3}{2} - \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$

(DO-SOL) - (DO-FA)

De esta forma se proceden a realizar todas las distancias de la escala, comprobando que sólo hay un tono 9/8 y un semitono diatónico pequeño $\frac{256}{243}$ llamado *Hemitono.*

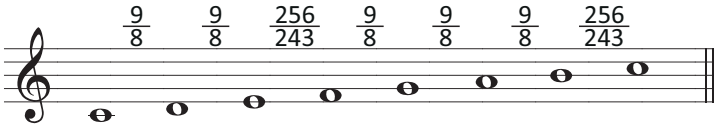

Imagen 55. Ejemplo de distancia de la Escala de Pitágoras

¿Sabías que se puede realizar la afinación pitagórica siempre que cumpla dos requisitos? *Ser monódica y diatónica. Sin embargo no es válida para la polifonía o cuando se introducen muchas alteraciones pues, al no poderse enarmonizar ¡Son necesarios 31 sonidos por cada octava! Tampoco es válida para los instrumentos de afinación fija o con trastes.*

Mediante la adición de quintas podemos construir las diferentes escalas a partir de cualquier nota. El cálculo de los diferentes intervalos se reduce a dos únicas operaciones: multiplicar n veces la quinta (3/2) y dividir m veces por la razón de la octava (2/1).

1.2.3. Virtudes de la Afinación Pitagórica

La afinación que destaca en De Institutione Musica de BOECIO es la afinación pitagórica.

La virtud de la afinación pitagórica[27] son sus quintas justas, por ello siguió utilizándose, incluso cuando se aceptaron otras teorías. También surgieron variantes en el s. XVI como Grammateus, Bermudo, Agrícola o Dowland. Era tan apreciada esta afinación por la perfección de sus quintas, que aún se utilizó en los s. XVIII y XIX, posiblemente por la afinación de los violines y porque el sistema de Rameau está basado en la progresión por cuartas de las fundamentales de los acordes.

También son perfectas sus octavas y cuartas justas.

[27] GAFFURIO en el s. XVI y Robert FLUDD en el s. XVII aún son partidarios de la afinación pitagórica.

 Prohibida su reproducción

Anteriormente nos hemos referido a las cuerdas porque su comportamiento es muy semejante a éstas: la frecuencia más grave de la onda de una membrana en oscilación es directamente proporcional a la tensión a la que está sometida e inversamente proporcional a su radio y densidad de superficie.

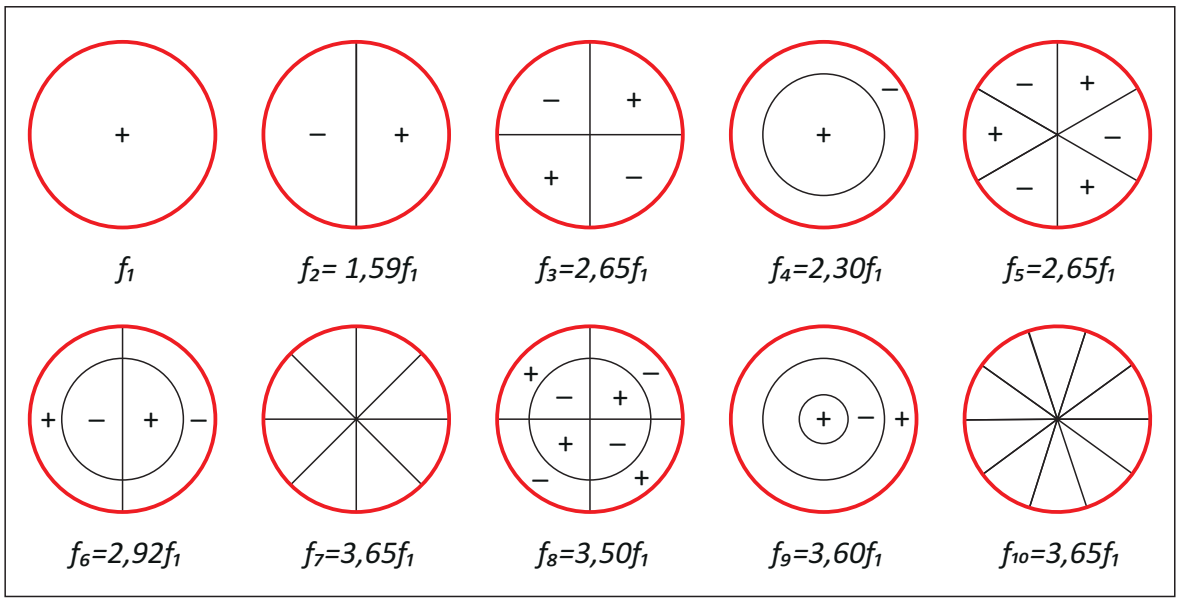

Imagen 66. Primeros 10 modos naturales de una membrana tensada, según sus líneas nodales y circulares.

En las membranas, sus vibraciones se basan en los mismos principios que poseen las cuerdas, ya que son materiales elásticos[42] tensados. Sin embargo, hemos de destacar una diferencia: en las cuerdas contemplamos una línea de puntos vibrando, mientras que en las membrana es una superficie.

Esto se traduce en que los puntos nodales de las cuerdas se convierten en líneas nodales en las membranas y por tanto, las ondas lineales en la cuerda se transforman en superficiales en las membranas hecho que origina que las ondas estacionarias sean de tipo bidimensional.

También tienen otra particularidad: los modos de vibración de las membranas no producen armónicos del sonido fundamental, por lo que en diversas ocasiones existen serias dificultades para conseguir los diferentes sonidos o una sensación similar y, teniendo en cuenta que al no poder variar sus dimensiones, es muy difícil modificar la tensión a la que están sometidas.

Por todo esto, el sonido producido es rico en parciales discordantes o sobretonos.

$$F= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8 + f_9 + f_{10}$$

$$F= f_1 + 1{,}59f_1 + 2{,}14\, f_1 + 2{,}30\, f_1 + 2{,}65\, f_1 + 2{,}92\, f_1 + 3{,}16\, f_1 + 3'50\, f_1 + 3'60\, f_1 + 3{,}65\, f_1$$

Al estar los parciales muy próximos entre sí, proporcionan gran intensidad al complejo sonoro que generan.

[42] Recordemos que un cuerpo elástico es aquel que cuando desaparecen las fuerzas o momentos exteriores recuperan su forma o tamaño original.

 Prohibida su reproducción

2.1. Aislamiento acústico

Algunos llaman al aislamiento acústico como el combate del ruido. Aquí se trata de impedir que sonidos indeseados ingresen a un recinto.

El nivel de aislamiento necesario dependerá de la función que se le asigne al recinto. Es decir, lo primero que se ha de determinar es que los niveles de "ruido de fondo" admisibles no son iguales en un estudio de grabación, una biblioteca o una oficina. Un error en la determinación de estos valores puede provocar consecuencias negativas en los objetivos que se pretenden alcanzar - es decir, en el funcionamiento normal de dicho recinto.

Las medidas a tomar para alcanzar los niveles deseados de aislamiento dependerán de la ubicación física del recinto y de las condiciones de producción sonora a su alrededor. La elección de una buena ubicación física puede significar un ahorro en los costos de implementación de las medidas de aislamiento.

Existen dos tipos de transmisión sonora que se deben evitar:

1. Las ondas sonoras que se transmiten por el aire o transmisión aérea.

2. Las que se transmiten por la estructura de la edificación o transmisión estructural.

2.1.1. Posibles medios para asilar acústicamente un recinto

a) **La ley de la masa indica que sólo la masa aísla acústicamente.** Es decir, ante situaciones críticas, se necesitarán paredes muy anchas y pesadas para lograr los objetivos deseados.

b) **La disipación que se produce cuando una onda sonora cambia de medio**, de manera que las paredes en forma de "sándwich" (compuestas por varias capas de materiales, incluso aire) suelen ser más eficientes que las de un solo material.

c) **Las dobles paredes** se realizan en casos extremos o lo que se conoce como el principio de la casa dentro de la casa.

d) **La construcción de pisos y techos flotantes unidos a las paredes** sólo en algunos puntos se realiza en casos especiales que pretenden evitar la transmisión estructural, y mediante mecanismos diseñados para amortiguar especialmente la transmisión de la onda sonora.

e) La eficacia de una barrera para detener el sonido se mide mediante la ***pérdida de transmisión de sonido*** **(pts)**, o sea, la pérdida de nivel de energía conforme pasa el sonido a través de una barrera.

> ***¿Sabías que cuanto mayor sea la masa de la barrera será mayor la pérdida de transmisión de sonido?*** *Por tanto, la barrera será mucho más eficaz. Sin embargo, como la relación entre la masa y pérdida de transmisión no es lineal hemos de tener en cuenta que en las bajas frecuencias las pérdidas tienden a ser más grandes, mientras que en otras frecuencias, resultan menores que las que indicaría una relación lineal.*

Así mismo existe una diversidad de comportamiento acústico con respecto a la pérdida de transmisión del sonido, especialmente en varios materiales que reflejamos en el siguiente cuadro:

 Prohibida su reproducción

ÍNDICE

TEMA I: INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA Pág

1.Breve reseña histórica 7
2.Concepto de Acústica 15
2.1. Acústica Física o Físico Acústica 15
2.2. Acústica Arquitectónica 18
2.3. Electroacústica 18
2.4. Acústica Fisiológica 18
2.5. Acústica Musical 18
2.6. Psicoacústica 18
2.7. Acústica Submarina. 19

TEMA II: ORIGEN Y FORMACIÓN DEL SONIDO Pág

1. Concepto de onda. 20
1.2. Magnitudes de una onda 20
1.2.1. Magnitudes de espacio: Ciclo, Elongación, Longitud de onda y Amplitud. . . . 20
1.2.2. Magnitudes de tiempo: Período, Fase, Tiempo de la Amplitud y Frecuencia . 22
1.3. Representación gráfica de las magnitudes de una onda. 23
1.4. Clasificación de las ondas 23
1.5. Movimiento Periódico. 28
1.6. Movimiento Oscilatorio 28
1.7. Movimiento Vibratorio 29
1.7.1. Movimiento vibratorio armónico simple. Movimiento vibratorio amortiguado. 30
1.7.2. Movimiento armónico complejo. 31
1.8. Representación gráfica de un movimiento vibratorio amortiguado 32
1.9. Origen y condiciones de existencias del sonido 33

TEMA III: MOVIMIENTO ONDULATORIO Pág

1. Tipos de movimiento ondulatorio 34
2. Movimiento de una onda. Longitud de onda 35
3. Interferencias 36
4. Pulsaciones 37
5. Efecto Doppler 38

TEMA IV: SONIDO Y RUIDO : PRODUCCIÓN, RECEPCIÓN Y CUALIDADES Pág

1. El Sonido 40
1.1. Concepto de Sonido 40
1.2. Elementos necesarios para obtener sonido 40
2. Ruido 41

 Prohibida su reproducción

2.1. Ruido Blanco 41
2.1.1.Aplicaciones del ruido blanco. 41
2.1.1.1. Procesamiento de señal. 41
2.1.1.2. Uso en vehículos de emergencia 42
2.1.1.3. Uso en los seres humanos 42
2.2. Ruido Rosa 42
3. Reflexión, Refracción, Difracción Y Absorción 43
3.1. Reflexión 43
3.1.1 Superficie Elíptica 43
3.1.2. Superficie Parabólica4 44
3.1.3. Eco y Reverberación 44
3.1.4. Fórmulas para calcular el tiempo de Reverberación 46
3.1.4.1. Fórmula de Sabine 46
3.1.4.2. Fórmula de Eyring. 47
3.1.4.3. Fórmula de Millington 48
3.2. Refracción 48
3.3. Difracción 49
3.4. Absorción 51
4. Velocidad y Propagación del sonido 52
5. Cualidades del sonido. 53
5.1. Tono o altura 53
5.2. Intensidad 53
5.3. Timbre. 55
5.4. Otras cualidades 55

TEMA V: EL PROCESO DE AUDICIÓN: EL OÍDO Pág

1. Anatomía del oído humano 56
2. Funcionamiento del oído humano 57
2.1. Aparato de Conducción o Transmisión de la onda sonora 57
2.2. Aparato de Percepción 59
3. La audición en los animales 60
3.1. Los elefantes 60
3.2. Los delfines 60

TEMA VI: FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA MUSICAL Pág

1. Índices Acústico-musicales. 61
2. El Diapasón 64
3. Afinación del “LA” patrón 65
4. Expresión de los intervalos 66
5. Operaciones con intervalos: suma, resta, ampliación y reducción 66
6. Sobre las consonancias: Teoremas de Tyndall y de Helmholtz. Estudios de Plomp . . . 69
6.1. Teoremas de Tyndall y de Helmholtz 69
6.2. Estudios de Plomp 71
6.3. Otras teorías de consonancias 72

 Prohibida su reproducción

TEMA VII: SISTEMAS DE AFINACIÓN Pág

1. El Sistema Musical Griego 74
   1.1. El Tetracordo: Géneros y base de generación de unidades mayores 74
   1.2. Los Pitagóricos 75
      1.2.1. La Afinación Pitagórica, Escala del Timeo o Escala de Eratóstenes 76
      1.2.2. Resultados destacados del Sistema de Pitágoras 76
      1.2.3. Virtudes de la Afinación Pitagórica 78
      1.2.4. Inconvenientes del Sistema de Pitágoras 79
   1.3. Aristógenes 80
      1.3.1. Sistema de Aristógenes 80
2. La Justa Entonación o Escala de Aristógenes-Zarlino o de los Físicos 81
   2.1. Inconvenientes de la Justa Entonación 82
3. El Temperamento Desigual de Salinas o Sistema del tono medio 84
4. El Temperamento Igual de Bartolomé Ramos de Pareja 86
5. El Sistema Holder 87
6. Sistema Mercator 87
7. Otros temperamentos irregulares 88
8. Sistemas Microtonalistas 89

TEMA VIII: PRODUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES EN LOS DISTINTOS INSTRUMENTOS Pág

1. Cuerpos y fuentes sonoras 91
2. Cuerdas sonoras 92
   2.1. Leyes de Mersenne o Leyes de la vibración de las cuerdas 93
3. Tubos sonoros 94
   3.1. Tubos abiertos 94
   3.2. Tubos cerrados 95
   3.3. Leyes de Bernoulli 97
4.Varillas, placas y membranas 98
   4.1.Varillas 98
      4.1.1. Vibraciones longitudinales de las varillas 98
      4.1.2. Vibraciones transversales de las varillas 99
   4.2. Membranas y Placas vibrantes 100
      4.2.1. Membranas 100
      4.2.2. Placas vibrantes 101
   4.3. Leyes de Chladni 103

TEMA IX. INGENIERÍA ACÚSTICA Y ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA . . . . . Pág

1. La ingeniería acústica para combatir el ruido 105
   1.1. Ruido 105
      1.1.1. Ruido continuo 105
      1.1.2. Ruido intermitente 106
      1.1.3. Ruido impulsivo 106
      1.1.4. Ruido de baja frecuencia 106
      1.1.5. Ruido tonal 106

 Prohibida su reproducción

1.2. Tolerancia al ruido 106
1.3. Medidas posibles a realizar para aminorar el ruido 107
2. Acústica de recintos 107
2.1. Aislamiento acústico 108
2.1.1. Posibles medios para asilar acústicamente un recinto 108
2.2. Tratamiento acústico 109
2.2.1 Energía y cámaras anecoicas 110
2.2.2 Timbre 111
2.2.3. Reverberación 111
2.2.4 Tiempo de reverberación 112
2.2.5 Tiempos óptimos de reverberación 112
2.2.6 Medidas de acondicionamiento 112
2.3. Principios del aislamiento acústico 113
2.3.1. Selección de materiales para el aislamiento acústico 113
2.3.1.1. El plomo 113
2.3.1.2. Hormigón, terrazo y acero 114
2.3.1.3. Cámara de aire 114
2.3.1.4. Lana de roca y lana de vidrio 114
2.3.1.4.1. La lana de roca 115
2.3.1.4.2. Paneles absorbentes 115

TEMA X. INTRODUCCIÓN A LA PSICOACÚSTICA Pág

1. Objetivos 116
2. Métodos y procedimientos en Psicoacústica 116
2.1. Método de Ajuste 116
2.2. Método de seguimiento (tracking) 117
2.3. Estimación de magnitud 117
2.4. Método Binario o Procedimiento Sí-No 117
2.5. Elección forzada de dos intervalos 117
2.6. Procedimientos adaptables 117
2.7. Comparación de pares de estímulos 117
3. Hechos comprobados y modelos que los explican 118
3.1. El timbre 118
4. Umbrales de la Audición 119
4.1. Umbrales absolutos 120
4.2. Umbrales diferenciales 120
4.3. Umbrales de frecuencia 121

 Prohibida su reproducción