



REUN

RED DE EDITORIALES
DE UNIVERSIDADES
NACIONALES



**EDITORIALES
DE LA
A.U.G.M.**
ASOCIACION DE
UNIVERSIDADES
GRUPO
MONTEVIDEO



ISBN Nº 950-673-196-9

ACUSTICA Y SISTEMAS DE SONIDO

UNR EDITORA
EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
URQUIZA 2050 - 2000 ROSARIO - REPUBLICA ARGENTINA
Impreso en la Argentina - Printed in Argentina

Prólogo

Este libro ha sido escrito con el objeto de proporcionar al lector una base conceptual sobre los sistemas de sonido que resulte aprovechable tanto para el lector no especializado como para el que se dedique profesionalmente al manejo y aplicación de los mismos.

Dado que el hombre es un "animal de costumbre", y como tal tiene la capacidad de habituarse a determinados estímulos exteriores a él, le resulta fácil adaptar su propia percepción de los fenómenos a diversos paradigmas. Así, la "alta fidelidad" fue virando desde la antigua grabación magnética sobre un hilo de acero hasta la actual tecnología digital, pasando por la fonografía en disco de pasta y en disco de vinilo, por la monofonía y la estereofonía, por la cinta abierta y el cassette, por los reductores de ruido complementarios y no complementarios. En cada una de esas etapas, la "calidad" del sonido seguramente conformó y hasta sorprendió a muchos, hasta que esa calidad era superada por la de una nueva tecnología. Todo esto muestra el grado de subjetividad del hombre a la hora de juzgar un fenómeno perceptivo como la calidad del sonido, y, por consiguiente, *la necesidad de contar con criterios imparciales*, que sólo se logran mediante un adecuado andamiaje conceptual. El enfoque general del texto es, por lo tanto, conceptual, poniendo el acento más sobre los aspectos perdurables que sobre la abundancia de detalles relativos a marcas, modelos, o inclusive tecnologías o técnicas específicas rápidamente obsolescentes.

Al seleccionar los temas a cubrir se puso especial énfasis en aquellos conceptos cuya comprensión resultaría beneficiosa para la actividad profesional del operador de sonido. Así, en los primeros capítulos se introduce la naturaleza ondulatoria del sonido y sus principales parámetros, como la frecuencia, la longitud de onda, la velocidad de propagación y la intensidad; la constitución espectral del sonido como superposición de tonos puros y sus consecuencias; los mecanismos perceptivos básicos, como la percepción de la altura, la intensidad y el timbre, el enmascaramiento y la espacialidad; los rudimentos de la acústica musical; y el comportamiento del sonido en los recintos, en cuanto a ambiencia, reverberación, absorción y aislación, incluyendo pautas para el tratamiento acústico de ambientes.

Luego se abordan los efectos del nivel sonoro excesivo sobre el oído humano, por ser éste un peligro considerable tanto para el operador de sonido como para el público que presencia un espectáculo o que participa de una fiesta o encuentro, o, peor aún, que concurre asiduamente a locales bailables con elevados niveles sonoros. Se aboga aquí por un uso responsable de la tecnología de audio.

Posteriormente se realiza un estudio de los sistemas de sonido, partiendo de las generalidades y luego centrándose en cada uno de los tipos de bloques principales que suelen aparecer en los modernos sistemas de sonido, ya sea para refuerzo sonoro como para la grabación y edición de la música o la voz. Así, se estudian primero los conceptos elementales de electricidad (tensión, corriente, potencia), imprescindibles para comprender las especificaciones y el conexionado de los equipos, y los conceptos de señal, ruido, distorsión y respuesta en frecuencia, para luego enfocar detalladamente los diversos dis-

positivos y los procesos que éstos involucran: micrófonos, amplificadores, altavoces (parlantes), compresores y expansores, filtros y ecualizadores, procesadores de efectos (retardos, ecos, vibrato, trémolo, reverberación, coro, flanger, phaser, distorsionadores, resaltadores, excitadores, transpositores de altura).

También se introducen los conceptos básicos del audio digital, como el muestreo, la digitalización, la frecuencia de muestreo, la resolución, los filtros antialias y de suavizado, el sobremuestreo. Luego se enfocan los procesos de registro analógico y digital del sonido. Por último, se estudia la consola de mezcla, como elemento integrador de todos los dispositivos anteriores.

En el tratamiento de los temas se ha procurado no abusar de desarrollos matemáticos y detalles técnicos, manteniéndose dentro de los límites de lo estrictamente necesario. De hecho, el nivel matemático requerido no va más allá del álgebra elemental que toda persona aprende en su instrucción secundaria. Se han apoyado las explicaciones con abundantes figuras, y se han intercalado ejemplos de aplicación en muchos temas para facilitar su comprensión. Se ha dado especial importancia a una discusión de las especificaciones de los diversos equipos, proporcionando en muchos casos criterios de selección en función de las posibles aplicaciones.

El texto puede ser utilizado por cualquier persona interesada en adquirir una visión conceptual sobre la acústica, el audio y los sistemas de sonido, pero será especialmente provechoso para aquellos que desarrollen su actividad profesional o laboral en este rubro, ya que con demasiada frecuencia nos encontramos con sonidistas, técnicos u operadores que desconocen casi por completo el material sobre el que trabajan, es decir el sonido, así como las herramientas de que disponen para captarlo, modificarlo, elaborarlo y darle una forma y presentación acordes a las diversas circunstancias.

Indudablemente, podrá obtenerse mayor beneficio de este libro si se tiene la posibilidad de experimentar con los diversos dispositivos discutidos en él. Una buena idea para interiorizarse y conocer más a fondo los equipos es acudir a los comercios especializados y solicitar demostraciones de la operación, así como revisar las especificaciones y relacionarlas con lo que se escucha.

Quisiera concluir agradeciendo a quienes hicieron posible esta obra. A Mario Oyarbide y a Juan Carlos Benvenuti, por haberme impulsado, desde el Centro de Estudios de Tecnologías Artísticas (CETeAr), a transformar mis embrionarios apuntes en un libro de texto; a Ezequiel García Pinilla y a Mauricio Santiago, quienes colaboraron en la revisión de los originales; a mis alumnos, quienes con sus preguntas y su participación me fueron dando ideas sobre cómo explicar mejor las cosas; a todos mis profesores y maestros (cuya lista es interminable), incluidos los autores de los numerosos libros de los que me he ido nutriendo a lo largo de mi vida. A mis padres, Julia Verdeja y José Miyara, que supieron educarme en la importancia del conocimiento. Por último, y muy especialmente, a mi esposa, María Victoria Gómez, y a mis hijos, Francisco y Andrés, quienes soportaron estoicamente y sin protestar la virtual ausencia que implica el redactar y dar forma final a un libro.

Federico Miyara
Rosario, julio de 1999

Contenido

- CAPÍTULO 1. Acústica Física** 1
Introducción. El sonido: un fenómeno ondulatorio. Velocidad del sonido. Sonidos periódicos. Longitud de onda. Periodo. Frecuencia. Presión sonora. Representación gráfica del sonido. Amplitud. Envolvente. Nivel de presión sonora. Algunas formas de onda. Onda senoidal. Espectro del sonido. Espectros inarmónicos. Espectros continuos.
- CAPÍTULO 2. Psicoacústica** 18
Introducción. Sensaciones psicoacústicas. Altura. Sonoridad. Timbre. Formantes. Direccionalidad del sonido. Efecto Haas. Espacialidad. Enmascaramiento
- CAPÍTULO 3. Acústica Musical** 31
Introducción. Consonancia y disonancia Escalas musicales. Instrumentos musicales acústicos. Instrumentos musicales electrónicos.
- CAPÍTULO 4. Acústica Arquitectónica** 44
Introducción. Ecos. Reflexiones tempranas. Ambiencia. Absorción sonora. Tiempo de reverberación. Tiempo de reverberación óptimo. Campo directo y campo reverberante. Resonancias. Materiales absorbentes acústicos. Aislación acústica.
- CAPÍTULO 5. Efectos del ruido en el hombre** 58
Introducción. Efectos no clínicos. Efectos clínicos no auditivos. Efectos auditivos. Evolución de la sordera profesional.
- CAPÍTULO 6. Señales y sistemas** 62
Introducción. Señales. Sistemas. Diagramas de bloques. Ruido. Rango dinámico. Distorsión. Respuesta en frecuencia. Procesamiento de Señal.
- CAPÍTULO 7. Electricidad** 71
Circuitos eléctricos. Corriente eléctrica. Tensión. Fuente ideal de tensión. Resistencia. Potencia eléctrica. Divisor de tensión. Fuente real de tensión. Adaptación de carga. Resistencias en serie y en paralelo. Impedancia. Defasaje. Valor eficaz.
- CAPÍTULO 8. Micrófonos** 82
Introducción. Sensibilidad. Respuesta en frecuencia. Direccionalidad. Micrófonos omnidireccionales, cardioides, figura de ocho. Micrófonos dinámicos. Micrófonos capacitivos. Polarización. Impedancia. Ruido. Distorsión. Otras especificaciones. Conexión balanceada. Fuente fantasma.

CAPÍTULO 9. Amplificadores

100

Introducción. Ganancia. Niveles de señal. Decibelios referenciados: dBm, dBu, dBV. Señales de bajo nivel, nivel de línea, nivel de potencia. Clasificación de los amplificadores: preamplificadores, amplificadores de potencia. Potencia máxima de salida. Sensibilidad. Relación señal/ruido. Respuesta en frecuencia. Slew rate (velocidad de subida). Distorsión armónica y por intermodulación. Impedancia de entrada. Factor de amortiguación. Separación de canales. Conexionado.

CAPÍTULO 10. Altavoces y cajas acústicas

114

Introducción. Clasificación de los altavoces por su rango de frecuencia. Altavoces de bobina móvil. Excitadores de compresión. Acoplamiento a bocina. Cajas acústicas. Baffles. Baffle infinito. Baffle cerrado. Baffle ventilado. Reflector de bajos. Especificaciones de potencia: potencia media máxima, potencia de programa máxima, potencia de pico máxima, potencia máxima EIA. Impedancia nominal. Sensibilidad. Nivel de presión sonora a una distancia y potencia dadas. Respuesta en frecuencia. Direccionalidad.

CAPÍTULO 11. Filtros y ecualizadores

129

Introducción. Filtros pasabajos y pasaaltos. Redes divisoras de frecuencia. Redes pasivas y activas. Multiamplificación. Ecualizadores. Controles de tono. Ecualizadores gráficos. Ecualización de un sistema electroacústico. Analizador de espectro. Ruido rosa. Ecualizadores paramétricos. Factor de mérito Q. Filtros notch.

CAPÍTULO 12. Acoples

143

Introducción. Realimentación electroacústica. Ganancia de lazo. Técnicas para eliminar los acoples.

CAPÍTULO 13. Compresores y limitadores

146

Introducción. Rango dinámico y relación señal/ruido. Compresores de audio. Amplificador controlado. Umbral. Relación de compresión. Efectos de la compresión. Ataque. Relevo. Hold. Nivel RMS y nivel de pico. Cadena lateral. De-esser y anti-pop. Limitadores. Compresor-limitador. Distorsión.

CAPÍTULO 14. Compuertas y expansores

158

Introducción. Compuertas. Umbral. Histéresis. Envolvente. Tiempo de ataque. Tiempo de relevo. Expansor. Umbral. Relación de expansión. Cadena lateral.

CAPÍTULO 15. Audio digital

163

Introducción. Numeración binaria. Muestreo. Frecuencia y periodo de muestreo. Teorema del muestreo. Frecuencia de Nyquist. Filtros antialias. Digitalización. Resolución en bits. Conversor analógico-digital. Ruido de digitalización. Relación señal/ruido máxima. Reconstrucción de la señal. Conversor digital/analógico. Retención simple. Filtro de suavizado. Sobremuestreo. Memorias digitales. Memoria RAM y ROM. Direccionalamiento. Dither.

- CAPÍTULO 16. Efectos I: concepto y estructuras** 174
Introducción. Efectos en serie y en paralelo. Conexiones de inserción. Envíos y retornos. Conexión auxiliar. Realimentación de efectos.
- CAPÍTULO 17. Efectos II: retardos, ecos, reverberación** 177
Introducción. Retardos analógicos. Retardos digitales. Reflexiones y ecos. Eco simple. Eco múltiple. Inserción de ecualizadores. Reverberación. Prerretardo y Reflexiones tempranas. Ambiencia. Aplicaciones. Efecto peine y su corrección. Otras aplicaciones de los retardos.
- CAPÍTULO 18. Efectos III: Modulación, Trémolo, Vibrato** 186
Introducción. Modulación. Osciladores de baja frecuencia. Trémolo. Modulación de amplitud. Velocidad. Profundidad. Vibrato. Modulación de frecuencia. Modulación de un retardo. Retardo de referencia.
- CAPÍTULO 19. Efectos IV: Coro (chorus), Flanger** 191
Introducción. Pulsaciones. Coro. Flanger. Antecedentes. Implementación digital. Cancelaciones por oposición de fase. Efecto peine. Resultados.
- CAPÍTULO 20. Efectos V: Wah-wah, Phaser** 196
Introducción. Modulación de un filtro. Wah-wah. Controles de frecuencia, profundidad, velocidad. Forma de la onda modulante. Phaser. Cancelaciones.
- CAPÍTULO 21. Efectos VI: Distorsionador, resaltadores** 199
Introducción. Alinealidades. Distorsionador. Diferencia entre la distorsión armónica y por intermodulación. Inserción de ecualizadores. Aplicación a líneas monódicas. Realzadores. Efecto psicoacústico. Aplicaciones.
- CAPÍTULO 22. Efectos VII: Transpositores de altura** 202
Introducción. Transposición de altura. Principio de operación de los transpositores digitales. Aplicaciones. Ajuste de afinación. Corrección de afinación. Armonización y polifonía.
- CAPÍTULO 23. Registro magnético** 206
Introducción. Tipos de registro. Cintas, discos flexibles, discos rígidos. Cinta abierta, cassette, DAT. Magnetismo y electromagnetismo. Teoría elemental del magnetismo. Interdependencia entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Ferromagnetismo. Dominios magnéticos. Magnetización. Histéresis. Principios de la grabación magnética. Principios de la reproducción magnética. Estructura de un cabezal de grabación/reproducción. Polarización con corriente continua y alterna. Borrado. Respuesta en frecuencia. La cinta magnética. Nivel de grabación. Especificaciones de los grabadores de cinta. Reductores de ruido. Reductores complementarios y no complementarios.

CAPÍTULO 24. Registro digital

233

Introducción. Clasificación de los sistemas de grabación digital. Principios de la grabación digital: sincronismo, detección y corrección de errores, ancho de banda. El disco compacto (CD): código de Reed-Solomon, subcódigo, modulación 8 a 14, sincronización. Especificaciones de los reproductores de discos compactos. Cinta de audio digital (DAT). Cassette Digital Compacto (DCC). Compresión de datos PASC. Corrección de errores, datos auxiliares y modulación. Especificaciones de los grabadores DCC. Aplicaciones de los sistemas DCC. Minidisc.

CAPÍTULO 25. Consolas de mezcla

252

Introducción. Funciones específicas de una consola. Estructura de una consola de mezcla. Canales de entrada. Entradas de línea y de micrófono. Fuente fantasma. Entradas balanceadas y no balanceadas. Ajuste de nivel de entrada. Filtros de corte de baja frecuencia. Canales Mono y Estereofónicos. Conexión de inserción (insert). Ecuador. Faders de canal. Paneo. Solo y Sordina. Conexión auxiliar (envío y retorno). Grupos o submasters. Amplificador de mezcla. Fader principal. Vúmetro. Sección de salida. Conexiones para grabador de cinta. Estructura de ganancia. Margen de sobrecarga (headroom). Especificaciones de las consolas. Conexionado. Puesta a tierra. Conclusión.

GLOSARIO

281

TERMINOLOGÍA EN INGLÉS

304

BIBLIOGRAFÍA

309

ÍNDICE ALFABÉTICO

311

Capítulo 1

Acústica Física

1.1. Introducción

La Acústica es la disciplina que se ocupa de estudiar el sonido en sus diversos aspectos. Se puede dividir en una gran cantidad de subdisciplinas, algunas de las cuales se listan en la **Tabla 1.1**. Nosotros nos ocuparemos brevemente de sólo de las cuatro primeras de éstas, a saber: la acústica física, la psicoacústica, la acústica musical y la

Tabla 1.1. Algunas subdisciplinas de la Acústica

Rama	Breve descripción
Acústica física	Análisis de los fenómenos sonoros mediante modelos físicos y matemáticos
Psicoacústica	Estudio de las sensaciones evocadas por los sonidos y sus diversos parámetros
Acústica musical	Estudio de los instrumentos musicales, las escalas, los acordes, la consonancia y la disonancia, etc.
Acústica arquitectónica	Estudio de la acústica de salas y su influencia sobre la escucha de la palabra y la música
Bioacústica	Estudio del efecto de los sonidos sobre los seres vivos, y de los sonidos producidos por éstos
Acústica fisiológica	Estudio del funcionamiento del aparato auditivo, desde la oreja hasta la corteza cerebral
Acústica ultrasónica	Estudio del ultrasonido, es decir el sonido inaudible de alta frecuencia, y sus aplicaciones
Acústica subacuática	Estudio del comportamiento del sonido en el agua, y sus aplicaciones
Macroacústica	Estudio de los sonidos extremadamente intensos, como el de las explosiones, turborreactores, etc.
Acústica estructural	Estudio del sonido que se propaga por las estructuras en forma de vibraciones
Acústica fonética	Análisis de las características acústicas del habla y sus aplicaciones
Mediciones acústicas	Técnicas de medición de diversos parámetros acústicos como frecuencia, intensidad, espectro, etc.

acústica arquitectónica. En este primer capítulo nos dedicaremos a los rudimentos de la acústica física, es decir el estudio de los fenómenos sonoros por medio de modelos físicos y matemáticos.

1.2. El sonido: un fenómeno ondulatorio

El sonido consiste en la propagación de una perturbación en el aire. Para comprender mejor este concepto imaginemos un tubo muy largo lleno de aire, con un pistón en un extremo. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas. Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo, o, más técnicamente, en equilibrio (Figura 1.1a). Este equilibrio es dinámico, lo cual significa que las moléculas no están quietas, sino que se mueven caóticamente en todas las direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente repartidas en el interior del tubo. En otras palabras, en cada centímetro cúbico (cm^3) de aire, ya sea cerca del pistón o lejos de él, hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas (una cantidad muy grande: unos 25 trillones).

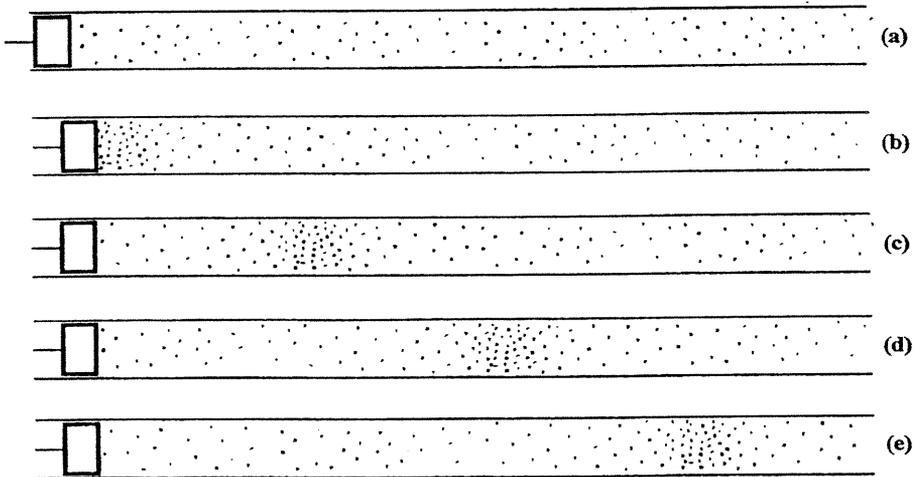


Figura 1.1. Propagación de una perturbación en un tubo. (a) El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). (b) Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. (c), (d), (e) La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Supongamos ahora que se desplaza rápidamente el pistón hacia el interior del tubo (Figura 1.1b). Las moléculas que se encuentran junto al pistón serán empujadas por és-

te, mientras que las que se encuentran muy alejadas no. Esto implica que en la zona del pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir que la misma cantidad de aire ahora ocupa menos espacio. En otras palabras, habrá ahora más moléculas por centímetro cúbico cerca del pistón que lejos de él. Al igual que lo que sucede cuando se abre la válvula de un neumático, el aire comprimido tiende a descomprimirse, desplazándose hacia la derecha, y comprimiendo a su vez el aire que se encuentra próximo a él (Figura 1.1c). Esta nueva compresión implica, otra vez, una tendencia a descomprimirse, que se efectiviza a costa de comprimir el aire contiguo (Figura 1.1d). El proceso se repite así en forma permanente, con lo cual la perturbación original (la compresión del aire cercano al pistón) se propaga a lo largo del tubo alejándose de la fuente de la perturbación (el pistón).

Este proceso se denomina también propagación de una onda sonora, y es similar a lo que sucede cuando en una pileta en calma se deja caer una piedra. En el instante en que la piedra golpea el agua, se produce una perturbación, que se propaga en forma de una circunferencia cuyo radio va en aumento, como se aprecia en la Figura 1.2.

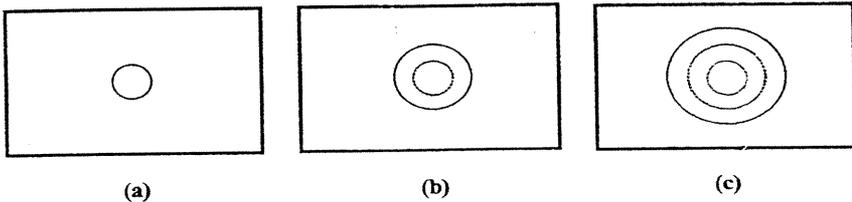


Figura 1.2. Una perturbación de la superficie del agua en una pileta inicialmente en calma se propaga como una circunferencia de radio cada vez mayor.

Al aire libre, es decir sin la restricción de un tubo (y en ausencia de superficies que reflejen el sonido), la perturbación se propaga, similarmente, en forma de una onda esférica cuyo radio va aumentando a medida que transcurre el tiempo.

1.3. Velocidad del sonido

Ahora nos preguntamos qué tan rápido se aleja la onda de la fuente. La respuesta es que el sonido se propaga con una velocidad c que en el aire a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ vale

$$c = 345 \text{ m/s,}$$

o bien

$$c = 1242 \text{ km/h.}$$

Esta velocidad varía algo con la temperatura (un $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$), por eso en diversos textos pueden encontrarse valores ligeramente diferentes. Una observación importante es que la velocidad del sonido es independiente de la intensidad de la perturbación.

Veamos algunos ejemplos. Si una persona se encuentra a 100 m de distancia de otra (aproximadamente una cuadra), un grito de la primera demorará, a causa de esta velocidad, 29 centésimas de segundo en llegar a donde se encuentra la segunda. Otro ejemplo es el de los relámpagos y los truenos. Un relámpago es una enorme chispa que se produce por una descarga eléctrica entre distintas capas de aire con cargas opuestas. Esta chispa produce a la vez luz y sonido. Sin embargo, la luz viaja a una velocidad mucho más alta, y alcanza nuestra vista casi instantáneamente, mientras que el sonido demora un tiempo apreciable en llegar a nosotros. Así, si cronómetro en mano comprobamos que el trueno se escucha 5 s después de ver un relámpago, conociendo la velocidad del sonido podemos calcular que el relámpago se produjo a una distancia

$$d = 345 \text{ m/s} \times 5 \text{ s} = 1725 \text{ m} = 1,725 \text{ km.}$$

Otro ejemplo interesante es el eco. Si gritamos frente a una superficie vertical un tanto alejada (por ejemplo una barranca o un acantilado), el sonido tardará un tiempo en llegar a la superficie, se reflejará en ella, y volverá demorando otro tiempo adicional. El resultado será que se escucha, unos instantes después, que la pared "repite" el grito. Más adelante veremos ejemplos correspondientes a los sistemas de sonido, en los cuales a causa de la distancia entre los parlantes y el público se producen retardos que es preciso corregir.

1.4. Sonidos periódicos

El fenómeno sonoro que analizamos anteriormente (Figura 1.1) consistía en una única perturbación del aire. La mayor parte de los sonidos de la naturaleza son, en realidad, el resultado no de una sino de múltiples perturbaciones sucesivas. Estos sonidos se denominan periódicos, y pueden dividirse en ciclos, donde cada ciclo abarca todo lo que sucede entre dos perturbaciones sucesivas del aire. En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de un sonido de este tipo. En (a) todavía no se ha producido ninguna perturbación. En (b) se produce la primera perturbación, que se propaga con una velocidad c alejándose del pistón. En (c), después de que la perturbación ha recorrido cierta distancia, el pistón se mueve nuevamente provocando una segunda perturbación. Mientras la primera perturbación sigue desplazándose con velocidad c , la segunda comienza a hacerlo también con velocidad c . En (d) y (e), se agregan nuevas perturbaciones, las cuales a su vez se propagarán con idéntica velocidad, y así sigue el proceso hasta que en algún momento cesa el sonido.

Siguiendo con la analogía de la piedra que cae en la pileta, podemos pensar en una sucesión de guijarros que caen sobre la superficie del agua, lo cual dará lugar a una serie de círculos concéntricos que van agrandándose a medida que van surgiendo nuevos círculos. Análogamente, al aire libre, y lejos de toda superficie capaz de reflejar el sonido, las sucesivas perturbaciones se propagarán como esferas concéntricas crecientes que se alejan de la fuente. En presencia de superficies reflectoras, la onda deja de ser esférica para volverse sumamente compleja.

Muchas veces se habla de campo sonoro para referirse a la forma en que se distribuye el sonido en los diversos puntos de un determinado espacio, por ejemplo dentro de una sala o al aire libre.

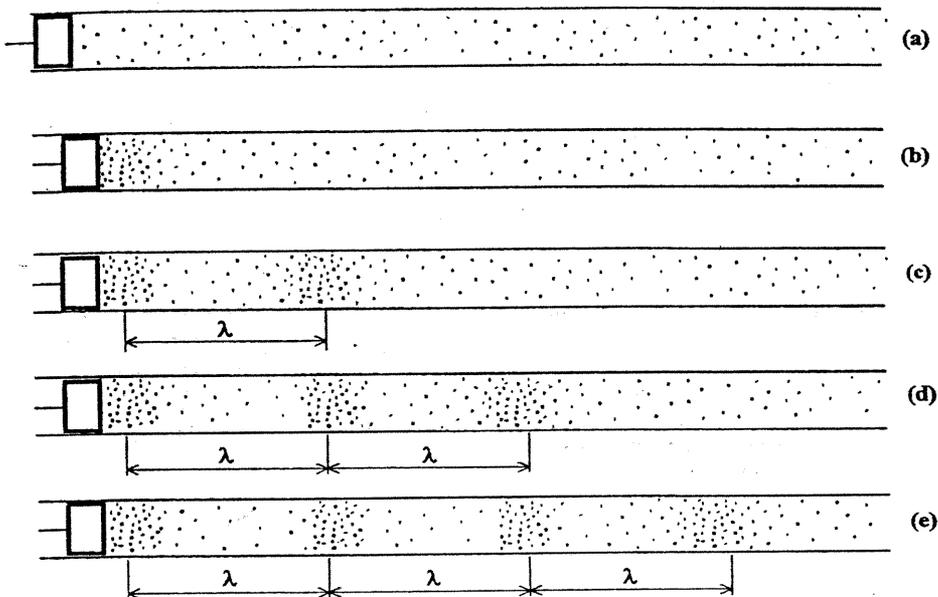


Figura 1.3. Un sonido consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, **periódica**. (a) El aire en reposo. (b) Primera perturbación. (c) Segunda perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia λ (longitud de onda). (d) Tercera perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia 2λ y la segunda una distancia λ . (e) Cuarta perturbación, cuando las anteriores han recorrido las distancias 3λ , 2λ , y λ respectivamente.

1.5. Longitud de onda

Vamos ahora a definir algunos **parámetros** muy importantes relacionados con los **sonidos periódicos**. El primero es la **longitud de onda**, que se representa con la letra griega *lambda*, λ , y es la **distancia entre dos perturbaciones sucesivas en el espacio** (Figura 1.3). Se mide en **metros (m)** o en **centímetros (cm)**, y para los sonidos audibles está comprendida entre los **2 cm** (sonidos muy agudos) y los **17 m** (sonidos muy graves).

La longitud de onda es importante en varias situaciones. En primer lugar, un objeto grande comparado con la longitud de onda es capaz de alterar significativamente la propagación del sonido cuando se interpone entre la fuente sonora y el oyente. Así, por ejemplo, los sonidos graves pueden "doblar la esquina" fácilmente porque su longitud de onda es grande. Los agudos, en cambio, cuya longitud de onda puede ser de apenas algunos cm, se ven considerablemente atenuados.

Otra situación en la cual la longitud de onda juega un papel importante es en la eficiencia de los altavoces. Cuando la longitud de onda λ emitida por un parlante es mucho más pequeña que su propio tamaño, la potencia emitida se reduce considerablemente. Por esa razón, los tweeters (altavoces de agudos) son mucho más pequeños que los woofers (altavoces de graves).

Por último, veremos más adelante que la respuesta de los micrófonos se ve alterada para aquellos sonidos de longitud de onda λ comparable con el tamaño del micrófono.

1.6. Periodo

Un segundo parámetro es el periodo, T , que se define como el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente. Se mide en segundos (s) o milisegundos (ms), es decir la milésima parte de un segundo. El periodo de los sonidos audibles para el ser humano varía entre los 0,05 ms (sonidos muy agudos) y los 50 ms (sonidos muy graves). Cabe destacar que son tiempos muy cortos que impiden en general que los ciclos puedan percibirse como fenómenos separados. El cerebro tiende a integrarlos en una única sensación, la sensación sonora.

1.7. Frecuencia

El tercer parámetro, uno de los más fundamentales en Acústica, es la frecuencia, f . Se define como la cantidad de ciclos por segundo, o lo que es lo mismo, la cantidad de perturbaciones por segundo. Se expresa en hertz (Hz), unidad llamada así en honor a Heinrich Hertz, científico del siglo XIX que descubrió las ondas de radio. Esta unidad es equivalente al ciclo por segundo (cps), aunque la unidad Hz se encuentra más frecuentemente en los textos y en las especificaciones técnicas de los diversos equipos. La frecuencia de los sonidos audibles está comprendida entre los 20 Hz (sonidos graves) y los 20.000 Hz (sonidos agudos) ó 20 kHz (kilohertz, es decir 2.000 Hz).

Existen algunas relaciones matemáticas importantes entre estos parámetros. Así, el periodo T y la frecuencia f están relacionados por las ecuaciones

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

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

en las cuales si T se expresa en s, entonces f se expresa en Hz, y si T se expresa en ms, f se expresa en kHz.

Por ejemplo, si sabemos que el periodo de cierto sonido es de 0,01 s, es decir 1/100 s, entonces la frecuencia será, aplicando la primera relación, 100 Hz. Si, en cambio conocemos que la frecuencia es de 1.000 Hz, aplicando la segunda relación se llega a que el periodo es de 0,001 s, es decir 1 ms.

La otra relación importante es la que vincula la longitud de onda con la frecuencia, y es la siguiente:

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

donde c es la velocidad del sonido. Así, un sonido de frecuencia 500 Hz, tiene una longitud de onda de

$$\lambda = \frac{345}{500} = 0,69 \text{ m} = 69 \text{ cm}$$

Como segundo ejemplo, la voz masculina (al hablar normalmente) tiene una frecuencia de unos 120 Hz, lo cual corresponde, según la fórmula anterior, a una longitud de onda de 2,88 m.

1.8. Presión sonora

Según hemos visto, el sonido puede considerarse como una sucesión de ondas de compresión seguidas por ondas de descompresión que se propagan por el aire a una velocidad de 345 m/s. Sin embargo, si nos ubicamos en una posición fija, veremos que la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente, conforme pasan por el lugar las sucesivas perturbaciones. Dado que nos referiremos bastante seguido a valores de presión, conviene aclarar que la unidad adoptada internacionalmente para la presión es el Pascal, abreviada Pa. Expresada en esta unidad, la presión atmosférica es del orden de 100.000 Pa (o, como se suele anunciar en los informes meteorológicos, alrededor de 1.000 hPa, donde hPa es la abreviatura de hectopascal, es decir 100 Pa). Ahora bien. Los aumentos y las disminuciones de presión debidas a las ondas sonoras son realmente muy pequeños comparados con este valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben como tales (después de eso se perciben como dolor) implican un aumento de unos 20 Pa. Para distinguir este incremento de la presión atmosférica en ausencia de sonido, se lo denomina presión sonora, abreviada p . Así, la presión sonora es lo que se debe agregar a la presión atmosférica en reposo para obtener el valor real de presión atmosférica.

Por ejemplo, si la presión en reposo es de 100.000 Pa y la presión en presencia de un sonido es de 100.008 Pa, entonces la presión sonora es

$$p = 100.008 \text{ Pa} - 100.000 \text{ Pa} = 8 \text{ Pa}$$

El trabajar con la presión sonora en lugar de la presión total, nos ahorra tener que arrastrar números con gran cantidad de cifras.

Las presiones sonoras audibles varían entre 0,00002 Pa y 20 Pa. El valor más pequeño, también expresado como 20 μ Pa (donde μ Pa es la abreviatura de micropascal, es decir una millonésima de Pa), se denomina umbral auditivo.

1.9. Representación gráfica del sonido

Hasta ahora no habíamos tenido en cuenta la manera en que se aplican las perturbaciones sucesivas. Así, podría ocurrir que éstas fueran el resultado de un suave vaivén

del pistón, o que por el contrario cada perturbación consistiera en una brusca sacudida del mismo. La realidad es que aún manteniéndose la frecuencia, ambos sonidos sonarán muy diferentes, lo cual muestra la importancia de conocer la forma de la perturbación. Para ello se utiliza un tipo de representación gráfica denominada oscilograma, que consiste en mostrar la evolución en el tiempo de la perturbación (Figura 1.4) en un par de ejes correspondientes al tiempo (eje horizontal) y a la presión sonora (eje vertical).

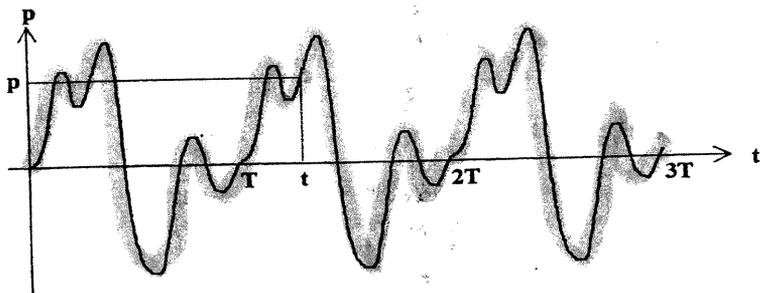


Figura 1.4. El oscilograma de un sonido, en el cual pueden apreciarse 3 ciclos o periodos completos del mismo. En el eje horizontal se representa el tiempo y en el eje vertical la presión sonora. Obsérvese que la forma de onda es en este caso relativamente compleja.

El significado de este gráfico es que para cada instante t , representado como un punto o posición en el eje horizontal, corresponde una presión sonora p , representada por una altura medida en la escala del eje vertical. Los valores positivos (arriba del eje t) representan compresiones y los valores negativos (debajo del eje t), descompresiones.

Es interesante explorar el significado del periodo T y de la frecuencia f en un oscilograma. En la Figura 1.4 se puede apreciar que T es la duración de cada ciclo o porción repetitiva de la onda. En la Figura 1.5, se ha dibujado la onda durante un tiempo de 1 s (en otra escala). Dado que hay 12 ciclos en dicho tiempo, la frecuencia es de 12 Hz.

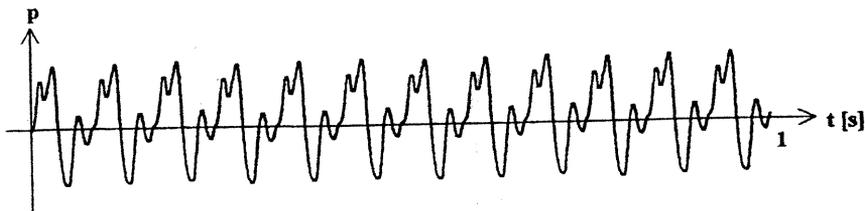


Figura 1.5. Significado de la frecuencia en un oscilograma. En la unidad de tiempo, es decir 1 s, se cuentan 12 ciclos, por lo cual la frecuencia es de 12 Hz.

1.10. Amplitud

El oscilograma nos permite interpretar fácilmente un parámetro del sonido vinculado a la fuerza o intensidad del mismo: la amplitud. La amplitud se define como el máximo valor que alcanza una oscilación en un ciclo. La amplitud se denomina también valor de pico o valor pico. En la Figura 1.6 vemos la misma forma de onda con dos amplitudes diferentes.

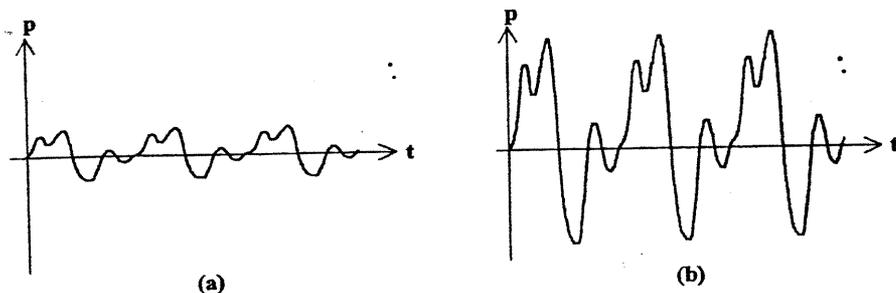


Figura 1.6. Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente amplitud. (a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud.

1.11. Envoltente

La amplitud de un sonido no es necesariamente constante, sino que puede variar en el tiempo. De hecho, la mayor parte de los sonidos reales tienen amplitud variable. Se define la envoltente de un sonido como la forma que se obtiene uniendo las amplitudes de los ciclos sucesivos. En la Figura 1.7 se puede apreciar una onda cuya amplitud varía en el tiempo. En línea de trazos se muestra la envoltente respectiva.

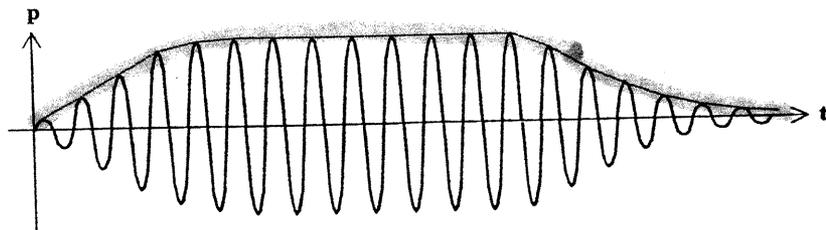


Figura 1.7. Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la envoltente, curva que une los picos de cada ciclo.

Veremos que la envolvente es uno de los factores decisivos en la determinación del timbre de una voz o instrumento. El otro factor es el espectro, que veremos también oportunamente.

1.12. Nivel de presión sonora

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre valores extremadamente pequeños ($0,00002 \text{ Pa} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$) hasta valores que si bien todavía pequeños, son *un millón* de veces más grandes que los anteriores (20 Pa). Estas cifras son poco prácticas de manejar, por lo cual se ha introducido otra escala que comprime este rango: la escala de decibeles. Para expresar una presión sonora en decibeles, se define primero una presión de referencia P_{ref} que es la mínima presión sonora audible (correspondiente al sonido más suave que se puede escuchar):

$$P_{\text{ref}} = 0,00002 \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa} .$$

Entonces se define el nivel de presión sonora, NPS (en inglés se utiliza la sigla SPL, sound pressure level), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad [\text{dB}] ,$$

donde P es la presión sonora, y \log_{10} el logaritmo en base 10. El resultado está expresado en decibeles, abreviado dB. Así, para un sonido apenas audible, para el cual $P = P_{\text{ref}}$, resulta

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} = 20 \log_{10} 1 = 0 \text{ dB}$$

dado que el logaritmo de 1 es 0. Como segundo ejemplo, consideremos un sonido que tiene una amplitud 1000 veces mayor que el anterior. Entonces

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{1000 P_{\text{ref}}}{P_{\text{ref}}} = 20 \log_{10} 1000 = 60 \text{ dB} ,$$

por ser $\log_{10} 1000 = 3$. Por último, para el sonido más intenso,

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} = 20 \log_{10} 1.000.000 = 120 \text{ dB} .$$

La expresión matemática mediante la cual se calcula el nivel de presión sonora no es en realidad importante *desde el punto de vista práctico*, ya que el instrumento con el que se mide NPS, es decir el *decibelímetro*, no está graduado en valores de presión, sino precisamente en dB, por lo cual en la práctica no hace falta *calcular* el valor de NPS a partir del correspondiente valor de presión.

En la Tabla 1.2 se indican algunos valores de conversión entre presión sonora y nivel de presión sonora.

Tabla 1.2. Valor de la presión correspondiente a varios niveles de presión sonora.

NPS [dB]	P [Pa]
120	20,0
110	6,3
105	3,6
100	2,0
95	1,1
90	0,63
85	0,36
80	0,20
75	0,11
70	0,063
60	0,020
50	0,0063
40	0,0020
30	0,00063
20	0,00020
10	0,000063
0	0,000020

1.13. Algunas formas de onda

Podemos afirmar que virtualmente cada sonido implica una forma de onda diferente. Existen sin embargo algunas formas de onda que reciben especial atención, ya sea por su simplicidad o por su utilidad práctica o teórica. La primera de ellas es la **onda cuadrada**, que consiste en dos niveles (generalmente uno positivo y el otro negativo) que se van alternando en el tiempo. Cada uno de ellos permanece un tiempo $T/2$, donde T es el periodo. En la **Figura 1.8** se muestra un ejemplo. Esta onda es importante por su simplicidad geométrica. No existe en la Naturaleza, pero es muy fácil de sintetizar electrónicamente.

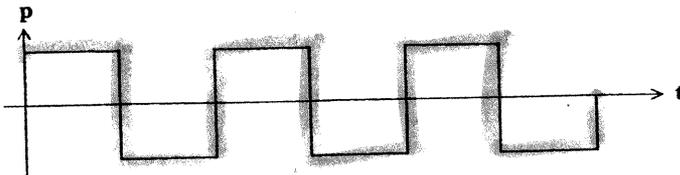


Figura 1.8. Tres ciclos de una onda cuadrada.

Una variante de la onda cuadrada es el **tren de pulsos**, en el cual el tiempo de permanencia en cada uno de los dos niveles no es el mismo. Se suele especificar un porcentaje que corresponde a la proporción del periodo en el nivel alto. En la Figura 1.9 se muestra un tren de pulsos al 25%.

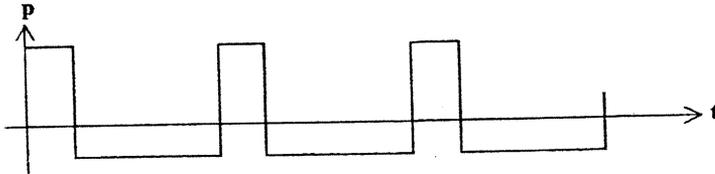


Figura 1.9. Tres ciclos de un tren de pulsos al 25%.

Otra forma de onda interesante es la **onda triangular** (Figura 1.10). Está formada por rampas que suben y bajan alternadamente.

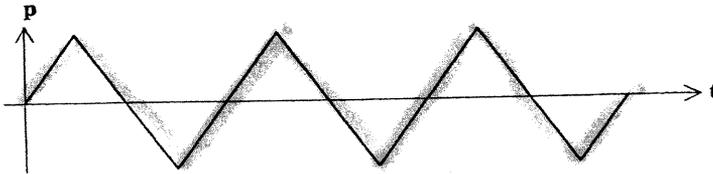


Figura 1.10. Tres ciclos de una onda triangular.

La **onda diente de sierra** (Figura 1.11) tiene una subida rápida y una bajada en forma de rampa o viceversa. Si bien tampoco es una forma de onda natural, la forma de onda del sonido del violín guarda cierta similitud con la diente de sierra. También tienen

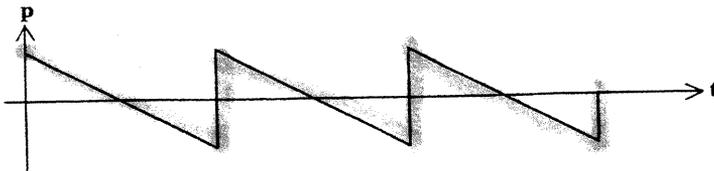


Figura 1.11. Tres ciclos de una onda diente de sierra

esta forma de onda los sonidos que se generan al rozar dos objetos, por ejemplo el chirrido cuando se frota rápidamente una tiza en un pizarrón.

1.14. Onda senoidal

Finalmente, tenemos la onda más importante, no sólo en Acústica sino en toda la Física y gran parte de la Matemática: la **onda senoidal** (Figura 1.12), también denominada **senoide** o **sinusoide**. Si bien matemáticamente tiene cierta complicación (está representada por la función trigonométrica **seno**), físicamente esta forma de onda corresponde a las oscilaciones más sencillas posibles. Pocos sistemas son tan simples como para oscilar senoidalmente. El más conocido es el péndulo: la oscilación de un peso suspendido de un hilo sigue una ley senoidal. En el campo de la música, el diapasón de herquilla (no confundir con el corista o afinador de banda) produce un sonido casi puramente senoidal. El silbido es también casi senoidal, y lo mismo ocurre con una flauta ejecutada *piano* (suave). Una cuerda de guitarra punteada muy suavemente en su punto medio también produce un sonido aproximadamente senoidal.

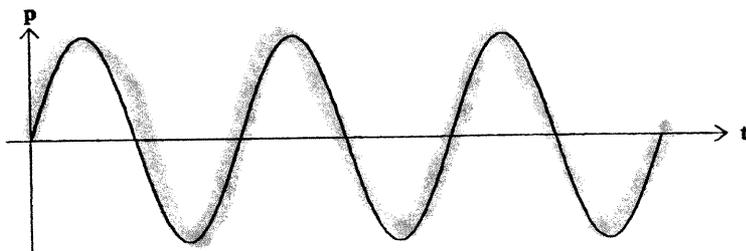


Figura 1.12. Tres ciclos de una onda senoidal o senoide.

Pero lo que da mayor importancia todavía a esta forma de onda es el hecho de que **cualquier onda periódica puede considerarse como una superposición** (suma) de ondas senoidales de distintas frecuencias, todas ellas múltiplos de la frecuencia de la onda (propiedad conocida como **Teorema de Fourier**). Dichas ondas se llaman **armónicos**. Esta superposición no se limita a ser un artificio de análisis del sonido, sino que si se escucha atentamente es perfectamente audible en muchos casos. **La onda senoidal es la más simple precisamente porque consta de una sola frecuencia.**

1.15. Espectro del sonido

Vimos que cualquier sonido periódico puede representarse como la suma de una serie de armónicos, es decir de sonidos senoidales cuyas frecuencias son f , $2f$, $3f$, $4f$, $5f$, etc. Por ejemplo, el LA central del piano, cuya frecuencia es de 440 Hz, contiene armónicos de frecuencias 440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, 2200 Hz, etc. Cada uno de estos armónicos puede tener su propia amplitud. En la Figura 1.13a se muestran los primeros armónicos de una onda cuadrada, y en la Figura 1.13b se ha obtenido su suma, que según se aprecia se va aproximando a la onda cuadrada.

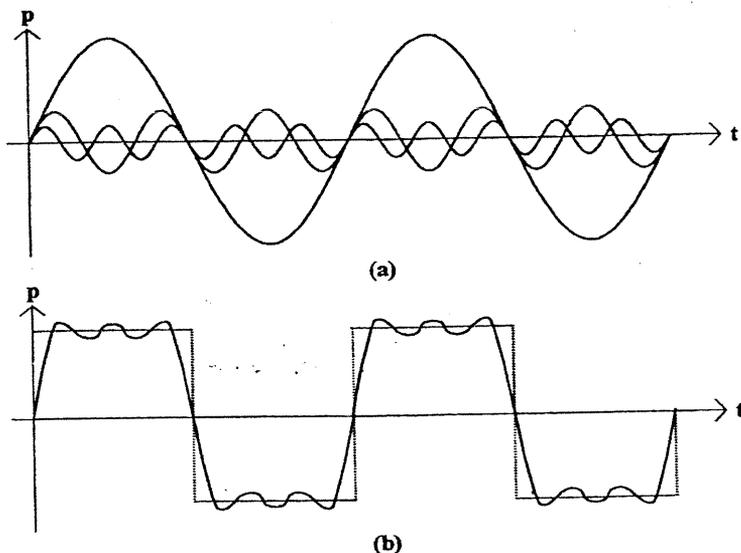


Figura 1.13. (a) Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia f_0 , cuyas frecuencias son f_0 , $3f_0$ y $5f_0$. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

La información sobre las frecuencias que contiene un determinado sonido y sus respectivas amplitudes constituyen lo que se denomina el **espectro** del sonido. El espectro se puede especificar en forma de tabla, o se puede representar gráficamente mediante un **espectrograma**, que es un gráfico con dos ejes: el horizontal, graduado en frecuencia, y el vertical, en amplitud. En la **Tabla 1.3** se indican los primeros armónicos para las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra, suponiendo que la amplitud es, 1 en los

Tabla 1.3. Amplitud de los primeros 7 armónicos del espectro de las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra.

ARMÓNICO N°	CUADRADA	TRIANGULAR	DIENTE DE SIERRA
1	1,27	0,81	0,64
2	0	0	0,32
3	0,42	0,09	0,21
4	0	0	0,16
5	0,25	0,032	0,13
6	0	0	0,11
7	0,18	0,017	0,091

tres casos, 1. En la Figura 1.14 se ha representado el espectrograma para una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz, incluyendo hasta el armónico 7.

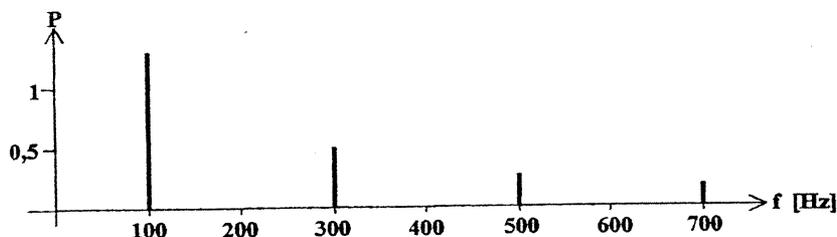


Figura 1.14. Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz. Esta onda tiene únicamente armónicos impares.

Así como la amplitud de un sonido puede variar en el tiempo de acuerdo con su envolvente, también es posible que los diversos armónicos que integran determinada forma de onda posean sus correspondientes envolventes, que no tienen por qué ser iguales. De hecho, esto es lo que sucede en la mayoría de los sonidos naturales. Un caso bastante común es que los armónicos superiores (los de frecuencias más altas) se extingan antes que los de menor frecuencia, quedando al cabo de unos segundos un sonido prácticamente senoidal. Esto sucede por ejemplo en el piano, cuyos sonidos comienzan con un gran contenido armónico (en cantidad y amplitud), lo cual se manifiesta como una sonoridad brillante e incisiva. A medida que transcurre el tiempo, los armónicos de mayor frecuencia van desapareciendo, y el sonido se vuelve más opaco.

Agregando un tercer eje para representar el tiempo (lo cual obliga a una representación tridimensional, a menudo hecha sobre el papel o la pantalla recurriendo a la perspectiva), es posible representar gráficamente la variación temporal de cada armónico, como se muestra en la Figura 1.15.

1.16. Espectros inarmónicos

Hasta ahora hemos analizado el caso de espectros armónicos, es decir en los cuales las frecuencias presentes eran múltiplos de cierta frecuencia, denominada **frecuencia fundamental**. No hay impedimento, sin embargo, para que los "armónicos" sean de frecuencias cualesquiera, por ejemplo 100 Hz, 235 Hz y 357 Hz. De hecho, muchos sonidos naturales son de esta última clase, por ejemplo el sonido de las campanas, o el correspondiente a los diversos tipos de tambores. En estos casos las ondas senoidales que constituyen el sonido en cuestión se denominan **sonidos parciales** en lugar de armónicos. Este tipo de sonidos no es periódico, a pesar de lo cual también pueden representarse gráficamente en un oscilograma. Sin embargo, lógicamente, *no podrá identificarse una frecuencia ni un periodo*. El espectro correspondiente a estos sonidos se denomina **espectro inarmónico**.

También puede representarse un espectrograma de estos sonidos. A diferencia de lo que ocurre en los espectros armónicos, las líneas espectrales no están equiespaciadas.

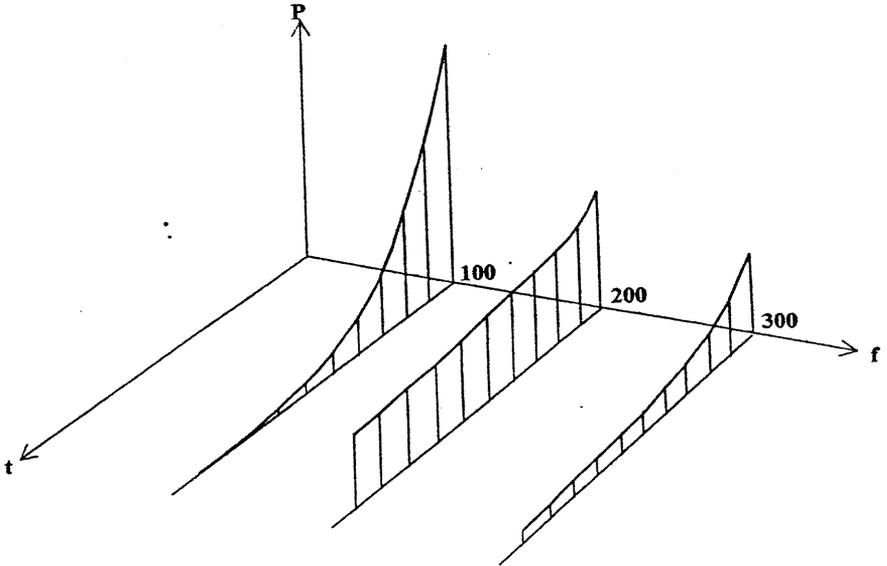


Figura 1.15. Espectrograma tridimensional en el cual se pone de manifiesto la evolución temporal de cada armónico. En este ejemplo se ha tomado una forma de onda de 100 Hz con sólo 3 armónicos. El armónico 1 (100 Hz) se extingue rápidamente, el armónico 2 (200 Hz) se extingue muy lentamente, y el armónico 3 (300 Hz) se extingue moderadamente rápido. Al cabo de algún tiempo, por consiguiente, predomina ampliamente el segundo armónico.

En el caso de los espectros inarmónicos *también puede existir una variación en el tiempo*, pudiendo en este caso inclusive *variar no sólo la amplitud de los sonidos parciales sino también la frecuencia*. En los sonidos reales esta variación existe, aunque normalmente es pequeña. Se debe a que la frecuencia con que vibran algunos cuerpos físicos varía ligeramente con la amplitud de vibración, por lo cual al ir disminuyendo esta amplitud, su frecuencia varía con ella.

1.17. Espectros continuos

Existe aún otro tipo de sonidos, formados por una cantidad muy grande de parciales muy próximos entre sí, que se denominan genéricamente **ruido**. Algunos ejemplos de esto son el sonido del mar, el ruido de fondo de un cassette y el sonido que se emite al

pronunciar las consonantes f, j, s, z o simplemente al soplar. Debido a la gran cantidad de parciales presentes, y al hecho de que cada uno es de amplitud muy pequeña, lo más conveniente es representar el espectro no mediante líneas espectrales individuales, sino como una curva continua (Figura 1.16) denominada densidad espectral, p^2 .

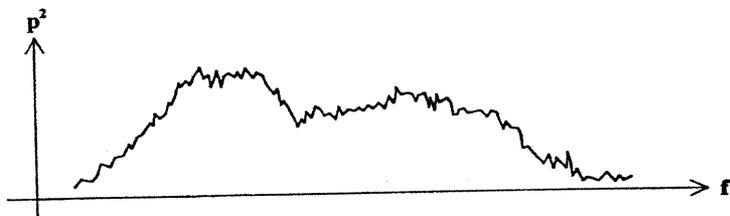


Figura 1.16. Ejemplo de espectro continuo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el vertical la densidad espectral, que representa la energía en función de la frecuencia.

Existen dos tipos de ruido que tienen importancia específica en Acústica: el ruido blanco y el ruido rosa. También se menciona a veces el ruido browniano. El ruido blanco (Figura 1.17a) se caracteriza por tener una densidad espectral constante, es decir igual para todas las frecuencias. Esto significa que contiene parciales de todas las frecuencias con igual amplitud. El nombre de ruido "blanco" proviene de realizar una analogía con la luz blanca, que contiene todos los colores del espectro con la misma intensidad. El ruido rosa (Figura 1.17b) contiene mayor proporción de bajas frecuencias (de allí el nombre de "rosa", ya que contiene todas las frecuencias pero más las bajas frecuencias, que en la luz corresponderían al color rojo). Tiene la particularidad de que en cada octava (es decir el intervalo de frecuencias desde un do al siguiente, o desde un re al siguiente, etc.) tiene la misma energía sonora. El ruido rosa tiene aplicación en la

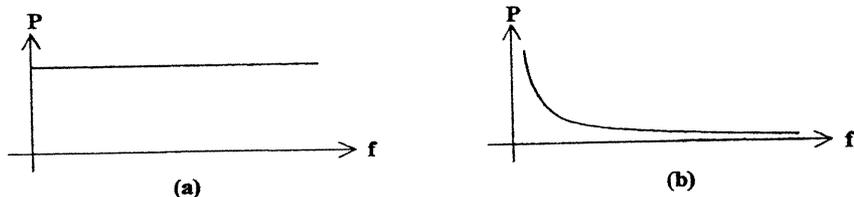


Figura 1.17. (a) Densidad espectral del ruido blanco. (b) Densidad espectral del ruido rosa.

ecualización de sistemas de sonido mediante ecualizadores por octavas o por tercios de octava. Es también una señal útil para la prueba de equipos de sonido, ya que es un tipo de ruido que suena natural al oído.

Capítulo 2

Psicoacústica

2.1. Introducción

Brevemente, la **Psicoacústica** se dedica a estudiar la percepción del sonido, es decir, cómo el oído y el cerebro procesan la información que nos llega en forma de sonido.

2.2. Sensaciones psicoacústicas

Cuando escuchamos un sonido, percibimos sensaciones que pueden ser clasificadas en tres tipos: la **altura**, la **sonoridad** y el **timbre**. La **altura** es la sensación que nos permite distinguir los sonidos graves de los agudos, y, más específicamente, diferenciar los sonidos de una escala musical. La **sonoridad**, en cambio, es la sensación por la cual distinguimos un sonido fuerte de uno débil. El **timbre** agrupa una serie de cualidades por las cuales es posible distinguir los sonidos de los diversos instrumentos y voces.

En una primera aproximación, cada parámetro físico del sonido se corresponde de manera más o menos directa con un tipo de sensación psicoacústica específica. Así, la **frecuencia** está relacionada con la sensación de **altura**, la **amplitud** con la **sonoridad**, y el **espectro** (incluyendo las posibles envolventes) con el **timbre**. Veremos, sin embargo, que la cuestión no es tan sencilla, existiendo en general una importante dependencia entre cada sensación y *todos* los parámetros del sonido.

2.3. Altura

La relación entre frecuencia y altura es bastante directa, correspondiendo las bajas frecuencias a sonidos graves y las altas frecuencias a sonidos agudos (**Figura 2.1**). En realidad, la altura como parámetro psicofísico varía un poco, además, con la intensidad del sonido, es decir que un sonido débil y otro fuerte de la misma frecuencia parecen tener alturas ligeramente distintas. También varía un poco con el timbre. Un timbre muy brillante parece ser más agudo que uno más opaco, aún cuando la frecuencia y la intensidad sean iguales.

La relación matemática entre la altura y la frecuencia es la siguiente. Si se conoce la frecuencia de una nota de la escala, por ejemplo f_{LA} , la frecuencia de la nota ubicada

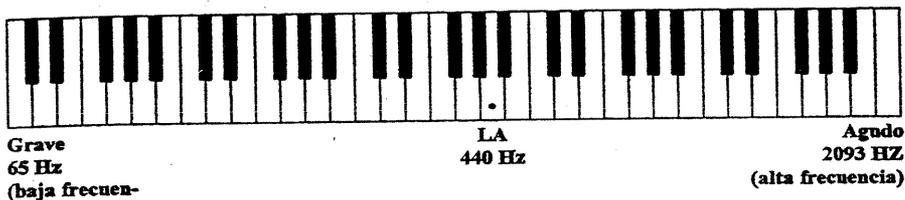


Figura 2.1. Relación entre la frecuencia y la altura en un teclado de 5 octavas. Se ha marcado el LA central, cuya frecuencia se encuentra normalizada internacionalmente a 440 Hz.

un semitono más arriba (es decir, en un teclado, la tecla blanca o negra inmediatamente a la derecha), en este caso f_{SIB} , puede obtenerse multiplicando por $\sqrt[12]{2}$:

$$f_{SIB} = \sqrt[12]{2} \cdot f_{LA} ,$$

es decir

$$f_{SIB} \cong 1,05946 \cdot f_{LA} .$$

Así, si $f_{LA} = 440$ Hz, resulta $f_{SIB} \cong 466,16$ Hz. Aplicando esta fórmula sucesivamente se puede determinar la frecuencia de todas las notas superiores al LA. Para las notas inferiores, se divide por $\sqrt[12]{2}$ en lugar de multiplicar por dicho valor.

En la Tabla 2.1 se dan las frecuencias correspondientes a la octava central (la que contiene el LA 440), obtenidas por este procedimiento. Para determinar las frecuencias de las notas de otras octavas, podría continuarse con el procedimiento anterior o bien

Tabla 2.1. Frecuencias correspondientes a las notas de la octava central.

NOTA	FRECUENCIA (Hz)
DO	261,63
DO#	277,18
RE	293,66
RE#	311,13
MI	329,63
FA	349,23
FA#	369,99
SOL	392,00
SOL#	415,30
LA	440,00
LA#	466,16
SI	493,88
DO'	523,25

utilizar otra relación matemática que indica que para obtener la frecuencia de una nota una octava más alta, simplemente se *multiplica por 2*. Por ejemplo el LA ubicado una octava por encima del LA central tiene una frecuencia de 2×440 Hz, es decir 880 Hz. Análogamente, para determinar la frecuencia de una nota una octava más baja, se *divide por 2*.

2.4. Sonoridad

La sensación de **sonoridad**, es decir de fuerza, volumen o intensidad de un sonido, está, en principio, relacionada con su **amplitud**. Sin embargo la relación no es tan directa como la que existe entre la frecuencia y la altura. De hecho, la sonoridad resulta en realidad fuertemente dependiente no sólo de la amplitud sino también de la *frecuencia*. Así, a igualdad de frecuencias podemos afirmar que un sonido de mayor amplitud es más sonoro. En la **Figura 2.2** se muestra el ejemplo de dos sonidos de 200 Hz, de los cuales el de mayor amplitud es más sonoro. Pero si aumentamos la frecuencia del sonido de *menor amplitud*, éste puede llegar a percibirse como *más sonoro*. En el ejemplo de la **Figura 2.3**, el sonido de menor amplitud se lleva a 600 Hz, percibiéndose ahora con mayor sonoridad.

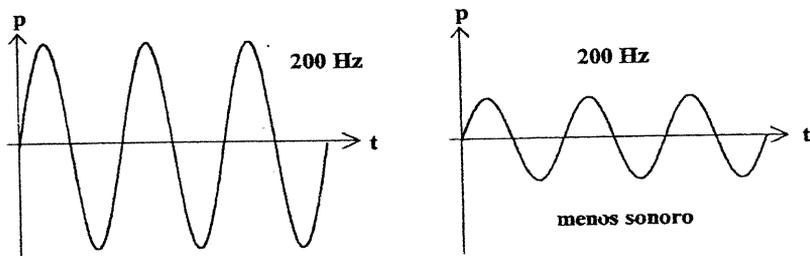


Figura 2.2. Dos senoides de frecuencia 200 Hz. La de mayor amplitud se percibe como más sonora.

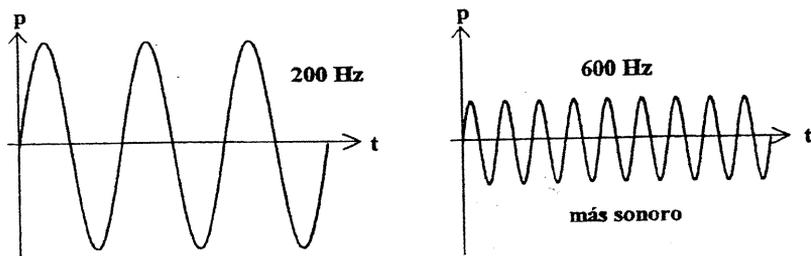


Figura 2.3. Dos senoides de frecuencia 200 Hz y 600 Hz respectivamente. La de mayor amplitud se percibe como *menos* sonora.

Los resultados anteriores obedecen al hecho de que el oído es más sensible en las frecuencias centrales, es decir entre 500 Hz y 5 kHz, que en las muy bajas o muy altas. Se han realizado investigaciones para demostrar este hecho, la primera de las cuales data de 1933, y fue llevada a cabo por los investigadores norteamericanos Fletcher y Munson. El experimento consistía en lo siguiente. Se hacía escuchar a personas de buena audición un tono puro (es decir senoidal) de 1 kHz y de un nivel de presión sonora conocido, por ejemplo 40 dB. Luego se les presentaba un tono de otra frecuencia (por ejemplo 200 Hz) y se les pedía que ajustaran el volumen hasta que les pareciera *igualmente sonoro* que el tono de 1 kHz. Por último se medía el nivel de presión sonora. Repitiendo este experimento con diversas frecuencias y niveles de presión sonora se obtuvieron las curvas de igual nivel de sonoridad, o curvas de Fletcher y Munson, que se adjuntan en la Figura 2.4. Estas curvas permitieron definir el nivel de sonoridad, NS, de un tono como el nivel de presión sonora de un tono de 1 kHz igualmente sonoro que dicho tono.

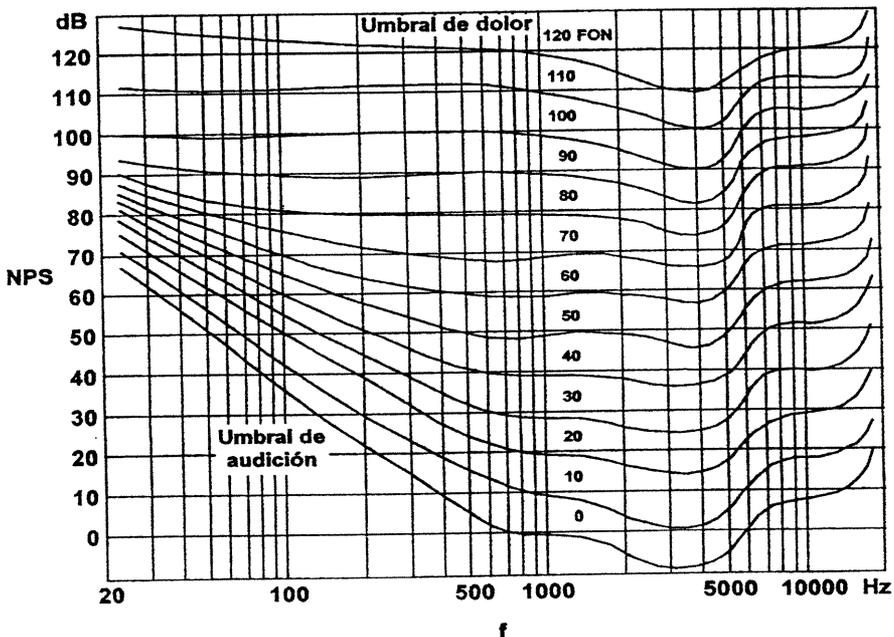


Figura 2.4. Curvas de Fletcher y Munson. Un tono de 200 Hz y 40 dB de NPS provocará la misma sensación de sonoridad que uno de 1000 Hz y 20 dB de NPS. Se dice entonces que tiene un nivel de sonoridad de 20 fon. Obsérvese que a igual NPS los sonidos muy graves (baja frecuencia) y los muy agudos (alta frecuencia) tienen menor nivel de sonoridad que los sonidos medios. Además, en la zona de los 3000 Hz se tiene la mayor sensibilidad del oído. La curva de 0 fon es el umbral de audición, y la de 120 fon, el umbral de dolor.

Para diferenciar el nivel sonoro del nivel de presión sonora, se lo expresa en fon. En la **Figura 2.4** se muestra el ejemplo de un tono de 200 Hz y 40 dB, el cual se escucha igualmente sonoro que uno de 1000 Hz y 20 dB, de donde el primero tiene $NS = 20$ fon. Las curvas extremas son los límites de la audición humana. La correspondiente a 0 fon es el **umbral de audición**, por debajo del cual una vibración del aire no es perceptible. Conviene aclarar que el umbral de audición depende realmente de la persona y del estado de su oído. La curva de 0 fon es el umbral para personas de buena audición. Una pérdida de 10 a 20 dB respecto a este umbral se considera normal. Por encima de los 25 dB de pérdida, comienzan las dificultades para la comprensión oral. La curva de 120 fon corresponde al **umbral de dolor**. De allí para arriba, en lugar de sonido como tal comienza a percibirse un *dolor intenso*, además de empezar de inmediato el *daño irreversible* del oído interno.

Las curvas de Fletcher y Munson permiten explicar diversos fenómenos y hechos que se observan en audiotécnica, por ejemplo por qué se requiere mayor potencia de un equipo de sonido para tener buenos graves que para lograr una adecuada respuesta en frecuencias medias. Son también la razón de los filtros de **sonoridad** de los equipos de sonido, que aumentan la proporción de graves cuando se escucha a bajo volumen. También explican por qué un equipo de baja potencia y mala calidad puede así y todo sonar "fuerte": al distorsionar el sonido, agrega armónicos de alta frecuencia que se escuchan más que las bajas frecuencias originales.

Una vez conocida esta característica de la audición, se pretendió construir un instrumento de medición capaz de indicar no la variable física asociada (por ejemplo el nivel de presión sonora), sino precisamente el nivel sonoro. Si bien ninguno de los intentos resolvió el problema por completo, se logró una solución aceptable agregando a un decibelímetro un filtro que tuviera una respuesta similar a la del oído. Para ello, antes de realizar la medición simplemente se atenúan los graves, que es justamente lo que hace el oído. El resultado fue una nueva escala de decibeles: los **decibeles A (dBA)**, que se popularizó a tal punto que la mayoría de las mediciones de sonido o ruido hoy en día se expresan en dBA. Las excepciones son los casos en que se requiere valores objetivos con carácter experimental. El instrumento utilizado para medir dBA es el **medidor de nivel sonoro** (no debe confundirse *nivel sonoro* con *nivel de sonoridad*, ya que el primero es el resultado de aplicar el filtro antedicho, mientras que el segundo es el parámetro psicoacústico definido por las curvas de Fletcher y Munson). En la **Tabla 2.2** se resumen algunos niveles sonoros de fuentes y ambientes típicos, que puede ser de utilidad para estimar un nivel sonoro cuando no se dispone de un medidor de nivel sonoro.

2.5. Timbre

El **timbre** de un sonido es una cualidad compleja, que depende de varias características físicas. El estudio de los diversos aspectos del timbre fue muy motivado por el deseo de reproducir artificialmente los sonidos de los instrumentos naturales, así como de crear timbres completamente nuevos, dando origen a diversas técnicas de **síntesis de sonidos**. Si bien hoy en día los **sintetizadores electrónicos** son los de mayor difusión y expansión, la síntesis de sonidos cuenta con varios siglos de historia. En efecto, el **órgano de tubos** puede atestiguar los esfuerzos del ingenio humano en este sentido.

Hay dos enfoques para el análisis del timbre. El primero estudia los sonidos aislados, y se propone identificar todos los elementos que los distinguen de otros sonidos. El

Tabla 2.2. Nivel sonoro para varias fuentes y ambientes típicos.

FUENTE	NS (dBA)
Umbral de dolor	120
Discoteca a todo volumen	110
Martillo neumático a 2 m	105
Ambiente industrial ruidoso	90
Piano a 1 m con fuerza media	80
Automóvil silencioso a 2 m	70
Conversación normal	60
Ruido urbano de noche	50
Habitación interior (día)	40
Habitación interior (noche)	30
Estudio de grabación	20
Cámara sonoamortiguada	10
Umbral de audición a 1 kHz	0

segundo enfoque, clasifica los sonidos según la fuente (por ejemplo un instrumento), y asocia una cualidad tímbrica con cada fuente.

El primer enfoque distingue un sonido grave de un clarinete, por ejemplo, de otro sonido agudo del mismo instrumento. De hecho, quien no conoce el clarinete, al escuchar separadamente ambos registros (grave y agudo) puede pensar que se trata de instrumentos diferentes. Aquí intervienen dos elementos: el espectro y las envolventes. Hay una envolvente primaria, que es la que determina la forma en que varía en el tiempo la amplitud general, y una serie de envolventes secundarias, que corresponden a las variaciones temporales relativas de los armónicos o de los parciales (según que el espectro sea armónico o inarmónico respectivamente). La envolvente primaria está fuertemente relacionada con la forma en que se produce el sonido, y caracteriza a familias completas de instrumentos. Las envolventes secundarias dependen de la manera en que se amortiguan las diferentes frecuencias del espectro.

En los sintetizadores electrónicos de sonidos se ha procurado desde el principio proveer recursos para controlar estas envolventes. Al principio se trabajaba con una envolvente primaria de 4 tramos, denominada ADSR (siglas de Attack-Decay-Sustain-Release, es decir Ataque-Caida-Sostén-Relevo), que se muestra en la Figura 2.5. Los sintetizadores actuales permiten, según su complejidad (lo cual en general está en proporción al costo), definir las envolventes con mayor precisión, es decir con mayor cantidad de tramos. Las envolventes secundarias se han implementado con una multitud de técnicas, por ejemplo la utilización de filtros variables con el tiempo, la modulación de frecuencia, y la síntesis aditiva.

Las envolventes mencionadas varían con la altura del sonido, es decir con su frecuencia, y también pueden variar con la intensidad, es decir con la amplitud del sonido. En el primer caso, resulta natural que en los sonidos de mayor frecuencia los tiempos se reduzcan, ya que a mayor frecuencia las cosas suceden más rápido. En el segundo caso, los sonidos más intensos producen un efecto equivalente a una distorsión, lo cual agrega más frecuencias al espectro, modificando de hecho las envolventes secundarias.

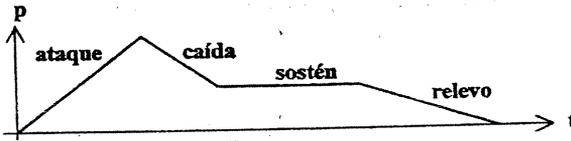


Figura 2.5. Envolvente característica de los primeros sintetizadores de sonido, formada por 4 tramos, que aproxima las envolventes de diversos instrumentos, variando la posición de los extremos de cada tramo.

2.6. Formantes

El segundo enfoque de análisis del timbre, en cambio, busca las características comunes a todos los sonidos de un instrumento o de una voz, y las que los distinguen de los sonidos de otros instrumentos o voces. El elemento fundamental de este análisis es la existencia de **resonancias** en los componentes accesorios al mecanismo propiamente dicho de producción del sonido, resonancias que **filtran** el sonido, favoreciendo determinadas frecuencias más que otras.

Para ilustrar este concepto, tomemos por ejemplo la voz humana. El mecanismo que produce el sonido son las denominadas **cuerdas vocales**, ubicadas en la laringe, detrás de la **nuz de Adán** (protuberancia notoria en los varones a la mitad del cuello). Dicho sonido es filtrado por las diversas cavidades del conducto vocal: la **laringe**, la **cavidad oral** (boca) y la **cavidad nasal** (interior de la nariz). Estas cavidades actúan como tubos, y es sabido que al escuchar a través de un tubo, el sonido se "colorea", es decir que adquiere una cualidad diferente de la original, debido precisamente a su **acción filtrante**, que privilegia algunas frecuencias sobre otras. Cada una de las cavidades agrega una "coloración" propia, que se combinan para originar no sólo el timbre particular de cada voz, sino el que corresponde, dentro de una misma voz, a cada vocal.

Las frecuencias de las resonancias se denominan **formantes**. En la Figura 2.6 se muestra, mediante un ejemplo, la forma en que actúan los formantes. Por simplicidad se ha supuesto que el sonido original tiene un espectro compuesto por varios armónicos de igual amplitud. Luego de atravesar el filtro, aquellos armónicos cuyas frecuencias son cercanas a los formantes F_1 , F_2 y F_3 predominan frente a las otras.

El cerebro es capaz de realizar (inconscientemente) un análisis tan elaborado de los sonidos que percibe el oído como para *detectar los formantes característicos de un instrumento o fuente sonora*, y así asociar como pertenecientes a *un único timbre* sonidos con espectros bastante diversos.

Por esta razón, el timbre puede reconocerse aún cuando debido a una deficiencia de un sistema de sonido el espectro se altere. Esto sucede, por ejemplo, en los equipos de mala calidad, que atenúan las frecuencias bajas (graves) así como las altas (agudos). Sin embargo, los formantes, que habitualmente están en la región central del espectro, es decir entre los 200 Hz y los 4000 Hz, no son tan severamente afectados y por lo tanto "sobreviven" a la distorsión, permitiendo reconocer el timbre. Un ejemplo son las radios de bolsillo. Otro es el teléfono; en este caso, la fundamental (primer armónico) de las

voces masculinas (y de gran parte de las femeninas) es virtualmente eliminada, lo que no impide que sigamos reconociendo ni los fonemas ni los timbres de voz.

No obstante, conviene aclarar que la mera identidad tímbrica no es equivalente a la fidelidad del sonido, aunque en muchos casos, como en el sistema telefónico, es suficiente con la primera para lograr una buena inteligibilidad del mensaje.

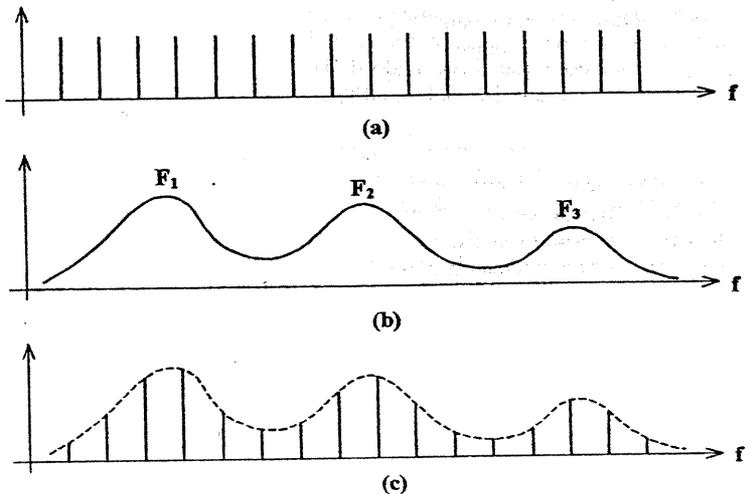


Figura 2.6. Efecto de los formantes. (a) Espectro hipotético de un sonido (por simplicidad se ha supuesto de amplitud constante). (b) Curva de los formantes. (c) Espectro luego de la acción de filtrado de los formantes.

Para concluir con esta breve descripción del timbre, es interesante observar que ni los formantes, ni las envolventes ni el espectro *tomados aisladamente* permiten explicar el timbre, que es más bien resultado de la interacción de todos estos factores. Se han realizado experimentos en los cuales se priva al sonido de un instrumento de su ataque (es decir se altera severamente su envolvente), y el sonido se vuelve prácticamente irreconocible, aunque sus formantes y su espectro permanezcan intactos. Por ejemplo, quitando el ataque al piano se obtiene un sonido que más bien parecerá ser de algún instrumento de viento. Del mismo modo, si conservamos la envolvente original pero cambiamos los formantes, se escuchará un sonido algo percusivo como el del piano, pero indudablemente diferenciado de aquél. Se han realizado multitud de experimentos que muestran fenómenos de este tipo y que ponen de manifiesto la complejidad del timbre.

2.7. Direccionalidad del sonido

Hasta el momento hemos estudiado el sonido como una onda de presión que pasaba por un lugar, sin prestar atención a su procedencia. Pero los sonidos reales se origi-

nan en fuentes que están ubicadas en algún lugar del espacio circundante, dando origen a dos tipos de sensaciones: la direccionalidad y la espacialidad. La direccionalidad se refiere a la capacidad de localizar la dirección de donde proviene el sonido. Esta sensación es la que nos permite ubicar visualmente una fuente sonora luego de escucharla. La espacialidad, en cambio nos permite asociar un sonido con el ambiente en el cual éste se propaga, y estimar por ejemplo las dimensiones de una habitación o una sala sin necesidad de recurrir a la vista.

La direccionalidad está vinculada con dos fenómenos. El primero es la pequeña diferencia de tiempos que hay entre la percepción de un sonido con el oído derecho y con el oído izquierdo, debido a que el recorrido de la onda sonora desde a la fuente (un instrumento, por ejemplo) hasta cada oído es diferente (Figura 2.7). Así, un sonido proveniente de la izquierda llegará antes al oído izquierdo, simplemente porque éste está más cerca de la fuente sonora. Esta diferencia es siempre menor que 0,6 ms.

El otro fenómeno es la diferencia de presiones sonoras (o intensidades), también causada por la diferencia entre las distancias. En el ejemplo del sonido que viene de la izquierda, la presión sonora es mayor en el oído izquierdo, no sólo por estar más cerca de la fuente, sino porque además la cabeza actúa como barrera para el sonido.

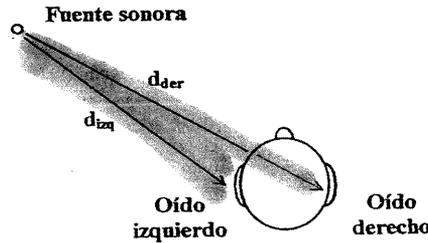


Figura 2.7. Direccionalidad del sonido. El recorrido entre la fuente sonora y el oído izquierdo es menor que el correspondiente al oído derecho, es decir $d_{izq} < d_{der}$. Por esto el sonido llega antes y con mayor presión al oído izquierdo que al derecho.

2.8. Efecto Haas (de precedencia)

Un experimento interesante consiste en alimentar unos auriculares estereofónicos con dos señales iguales, una de las cuales se encuentra ligeramente retardada respecto a la otra (Figura 2.8). Si se va aumentando el retardo desde 0 a 0,6 ms, se crea la sensación de una fuente virtual (es decir aparente) que parece desplazarse desde el frente hacia el lado que no experimenta retardo. Después de los 0,6 ms y hasta los 35 ms de retardo, la fuente virtual permanece más o menos fija, pero parece *ensancharse* cada vez más. Para retardos mayores de 35 ms la fuente virtual se divide en dos, percibiéndose separadamente ambos canales, como provenientes de fuentes diferentes. A medida que el retardo se hace mayor, el segundo sonido aparece como un eco del primero. Este experimento

ilustra el denominado **efecto de precedencia**, o también **efecto Haas** (en honor al investigador que estudió sus consecuencias para la inteligibilidad de la palabra), que puede utilizarse para controlar de un modo más realista la ubicación aparente de una fuente en la imagen estereofónica.

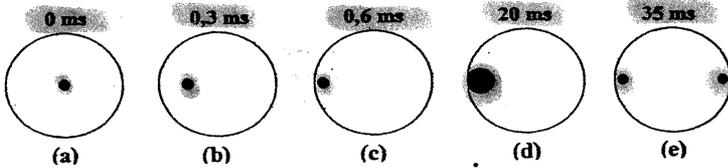


Figura 2.8. Efecto Haas, o efecto de precedencia. Se envía por medio de auriculares un sonido corto a ambos oídos, estando el correspondiente al oído derecho retrasado respecto al del oído izquierdo. En la figura se muestran las imágenes auditivas ante diferentes retardos: (a) La señal llega a ambos oídos simultáneamente (sin retardo). (b) La señal llega al oído izquierdo 0,3 ms después que al oído derecho: la fuente virtual se desplaza hacia la derecha. (c) La señal llega al oído izquierdo 0,6 ms después que al oído derecho: la fuente virtual deja de moverse. (d) La señal llega al oído izquierdo 20 ms después que al oído derecho: la fuente virtual parece ensancharse. (e) La señal llega al oído izquierdo 35 ms después que al oído derecho: por primera vez se crea la sensación de *dos fuentes virtuales*.

2.9. Espacialidad

La espacialidad del sonido depende de varios factores. El primero es la **distancia entre la fuente y el oído**. Esto está vinculado a la familiaridad que se tenga con una fuente sonora específica (o un tipo de fuente). A mayor distancia, la presión sonora es menor, lo que hace que si se conoce la fuente, se pueda tener una idea de la distancia. Por ejemplo, si escuchamos a alguien *hablar normalmente*, podemos saber si se encuentra cerca o lejos. Si se trata de una fuente desconocida, el cerebro la asociará inconscientemente con alguna fuente que resulte más familiar.

El segundo factor lo constituyen las **reflexiones tempranas**. En el descampado, la onda sonora generada por una fuente se aleja indefinidamente atenuándose hasta volverse inaudible (Figura 2.9a). En un ambiente cerrado, en cambio, la onda sonora se refleja en las paredes múltiples veces (Figura 2.9b). Las primeras reflexiones se denominan **reflexiones tempranas**. Las reflexiones tempranas proveen al sistema auditivo una clave temporal que se relaciona con la distancia entre las paredes, lo cual a su vez se vincula al tamaño del ambiente. Esto crea la sensación de **ambiencia**.

El tercer factor que hace a la espacialidad del sonido es la **reverberación**. El fenómeno de la reverberación se produce como consecuencia de las numerosas reflexiones tardías del sonido. Mientras que las primeras reflexiones (las reflexiones tempranas) están distanciadas considerablemente, las subsiguientes comienzan a superponerse entre sí, debido a que aparecen las reflexiones de las reflexiones, y luego las reflexiones de las

reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente. Esto lleva a que al cabo de unos pocos instantes se combinen miles de reflexiones que dan origen a la reverberación (Figura 2.10).

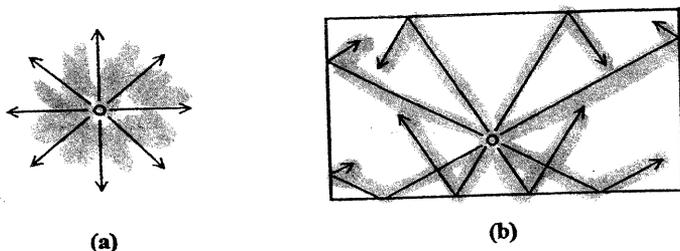


Figura 2.9. (a) Una fuente sonora en campo abierto: el sonido se aleja indefinidamente de la fuente. (b) Una fuente sonora encerrada en un ambiente cerrado: el sonido se refleja una y otra vez en las superficies del recinto (paredes, techo y piso).

El efecto más conocido de la reverberación es el hecho de que el sonido se prolonga aún después de interrumpida la fuente. Por ejemplo si golpeamos las manos, aunque el sonido generado es muy corto, "permanece" en el ambiente durante algunos instantes. El tiempo de permanencia, o tiempo de reverberación, depende de las características acústicas del ambiente, y nos da una clara sensación de espacialidad que puede y debe ser aprovechada en audiotécnica para evocar ambientes de gran realismo.

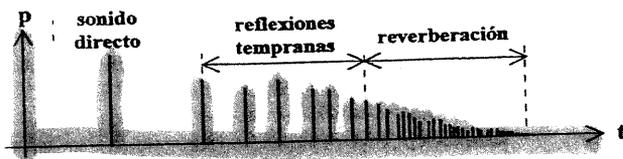


Figura 2.10. Reflexiones tempranas y reverberación en un ambiente cerrado.

El último factor que interviene en la sensación de espacialidad es el movimiento de la fuente. Muchas fuentes son fijas, pero otras son móviles, y la movilidad es percibida a través no solo del desplazamiento evocado por la dirección de procedencia del sonido, sino por el denominado efecto Doppler, por el cual la frecuencia de una fuente móvil parece cambiar. Así, cuando una ambulancia se acerca a nosotros, la altura (frecuencia) del sonido emitido por la sirena es mayor (más agudo) que cuando la ambulancia se detiene. Cuando, contrariamente, ésta se aleja, la altura baja, (más grave). Este efecto sólo rara vez se utiliza en música, ya que normalmente se supone que los instrumentos musicales se mantienen en una posición determinada, o los eventuales desplazamientos se producen con lentitud, siendo el cambio de frecuencia imperceptible. Tiene aplicación,

sin embargo, en las bandas de sonido de películas o videos, ya que permite simular con mayor realismo una fuente móvil (típicamente un vehículo).

2.10. Enmascaramiento

Dentro de las cualidades del oído hay una que tiene consecuencias de gran importancia para la audición, y es el hecho de que los sonidos son capaces de enmascarar a otros sonidos. Enmascarar a un sonido significa ocultarlo o hacerlo imperceptible. El enmascaramiento es un fenómeno bastante familiar para todos. Sucede, por ejemplo, cuando intentamos escuchar a alguien que habla en medio de un ruido muy intenso: no podemos discriminar lo que dice porque su voz es enmascarada por el ruido:

Es interesante observar que el enmascaramiento es una propiedad del oído, no del sonido. En un buen equipo de audio, si mezclamos un sonido muy intenso (por ejemplo 90 dB) con otro muy débil (por ejemplo 20 dB), la salida de los parlantes contendrá ambos sonidos en sus proporciones originales. Esto puede comprobarse aislando sucesivamente, mediante filtros adecuados, uno u otro sonido. Sin embargo el oído no percibirá el de 20 dB.

Se ha estudiado con gran detalle el efecto enmascarador de los sonidos sobre otros sonidos. Para ello se determinó cómo cambia la curva del umbral de audición ante la presencia de un sonido dado (denominado sonido máscara, o sonido enmascarante). Esta determinación se repitió para diversos sonidos máscara, de distintas frecuencias, amplitudes y contenidos espectrales. A modo de ejemplo, en la Figura 2.11 se muestra el efecto de un tono máscara de 400 Hz para varios niveles sonoros (40 dB, 60 dB y 80 dB). Se puede apreciar que a medida que aumenta el nivel de presión sonora del tono máscara, mayor resulta el incremento del umbral, lo cual significa que los otros tonos deberán ser cada vez más intensos para no ser enmascarados. Por otra parte, la región enmascarada se ensancha, vale decir que la zona de influencia de la máscara crece. En otras palabras, al aumentar el nivel del tono máscara, se produce un incremento cuantitativo (mayor nivel) y cualitativo (más frecuencias) del umbral.

El enmascaramiento es, en cierto sentido, un defecto del oído, pero también es una virtud, ya que nos permite desembarazarnos de una cantidad de información inútil o difícil de procesar por el cerebro. Una interesante aplicación actual del enmascaramiento es la compresión de los datos de audio digital, de manera de reducir la cantidad de espacio requerido para almacenar un tiempo dado de música. La técnica se basa en aprovechar que mucha información que aparece en una grabación de alta calidad no aporta nada a la audición, ya que es enmascarada por otros tonos presentes, de modo que puede eliminarse, con ahorro de espacio. Por ejemplo, si se detecta que existe un tono de 400 Hz de 80 dB, de acuerdo a lo indicado por la curva de 80 dB de la Figura 2.11 un tono de 1000 Hz y 30 dB será inaudible, y por consiguiente se puede eliminar sin perjuicio alguno para la calidad de la reproducción. Esta idea se aplica en los DCC (Digital Compact Cassette, o cassette compacto digital) y en los MD (Minidisc), así como en el formato comprimido MPEG usado en Internet. Últimamente también se está utilizando para mejorar la calidad de los CD (Compact Disc) del estándar de 16 bits a 19 ó 20 bits.

La música funcional de los locales comerciales, los bares y algunas salas de espera de consultorios médicos, también aprovecha el fenómeno de enmascaramiento, posibilitando cierta "privacidad pública", al impedir que las conversaciones ajenas puedan ser escuchadas por terceras personas.

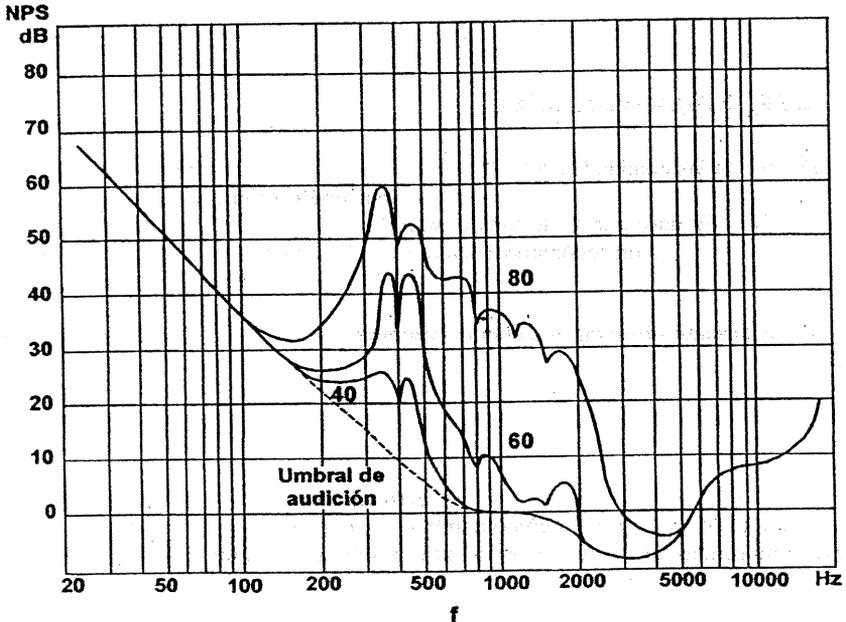


Figura 2.11. Enmascaramiento. Curvas de umbral de audición ante la presencia de un tono máscara de 400 Hz (según Egan, Harold y Hake). Se muestran las curvas correspondientes a los casos en que el tono máscara tiene niveles de presión sonora de 40 dB, 60 dB y 80 dB respectivamente, y en línea de trazos, el umbral de audición original. Se observa que cuanto mayor es el nivel del tono máscara, mayor es el incremento del umbral, y *más amplia* la zona del espectro afectada.

Por último, también se apela al enmascaramiento en forma inconsciente cuando se incrementa el volumen de un equipo de música ante la existencia de ruidos ambientales. En este caso, al elevar el nivel sonoro de la música, ésta enmascara al ruido ambiente, permitiendo escuchar la música en mejores condiciones. En el mundo moderno el ruido ambiente es considerable, lo que ha llevado a la sociedad al acostumbramiento, y aún a la predilección por la música "a todo volumen". Esto es potencialmente peligroso para la salud auditiva (ver capítulo 5).