



$$W_x = \frac{M \cdot \omega^2}{2}$$

Entornos invisibles

(de la ciencia y la tecnología)

Estadio de rock

Capítulo 5

Guía didáctica

Autores | Gustavo Basso | Jorge Petrosino

Autoridades

Presidente de la Nación

Dra. Cristina Fernández de Kirchner

Ministro de Educación

Dr. Alberto E. Sileoni

Secretaria de Educación

Prof. María Inés Abrile de Vollmer

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica

Lic. María Rosa Almandoz

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional

Ing. Roberto Díaz

Ministerio de Educación.

Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Saavedra 789. C1229ACE.

Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

República Argentina.

2011

Director de la Colección:

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinadora general de la Colección:

Claudia Crowe

Diseño didáctico y corrección de estilo:

Lic. María Inés Narvaja

Ing. Alejandra Santos

Coordinación y producción gráfica:

Augusto Bastons

Diseño gráfico:

María Victoria Bardini

Augusto Bastons

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Ilustraciones:

Diego Gonzalo Ferreyro

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Administración:

Cristina Caratozzolo

Néstor Hergenrether

Colaboración:

Jorgelina Lemmi

Psic. Soc. Cecilia L. Vázquez

Dra. Stella Maris Quiroga

“Colección Encuentro Inet”.

Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum.

Coordinadora general de la Colección: Claudia Crowe.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Reproducción autorizada haciendo mención de la fuente.

Industria Argentina

ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición -Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto-.

Colección Encuentro Inet

Esta colección contiene las siguientes series (coproducidas junto con el Instituto Nacional de Educación Tecnológica - INET):

- La técnica
- Aula-taller
- Máquinas y herramientas
- Entornos invisibles de la ciencia y la tecnología

DVD 4 | Aula-taller

Capítulo 1

Biodigestor

Capítulo 2

Quemador de biomasa

Capítulo 3

Planta potabilizadora

Capítulo 4

Probador de inyecciones

DVD 5 | Aula-taller

Capítulo 5

Planta de tratamiento de aguas residuales

Capítulo 6

Tren de aterrizaje

Capítulo 7

Banco de trabajo

Capítulo 8

Invernadero automatizado

DVD 6 | Máquinas y herramientas

Capítulo 1

Historia de las herramientas y las máquinas herramientas

Capítulo 2

Diseño y uso de Máquinas Herramientas

Capítulo 3

Diseño y uso de Herramientas de corte

Capítulo 4

Nuevos paradigmas en el mundo de las máquinas herramientas y herramientas de corte

DVD 7 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 1
Parque de diversiones

Capítulo 2
Cocina

Capítulo 3
Red de energía eléctrica

Capítulo 4
Campo de deportes

DVD 8 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 5
Estadio de Rock

Capítulo 6
Estructuras

Capítulo 7
Chacra orgánica

Capítulo 8
Bar

DVD 9 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 9
Estación meteorológica

Capítulo 10
Restaurante

Capítulo 11
Seguridad en obras de construcción

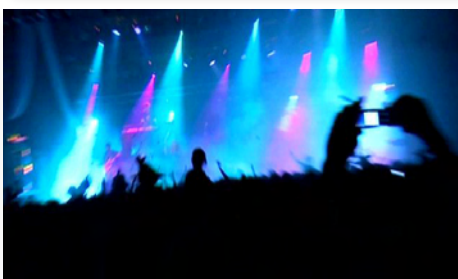
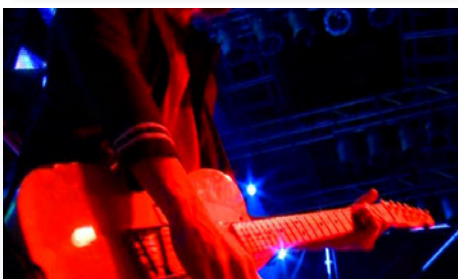
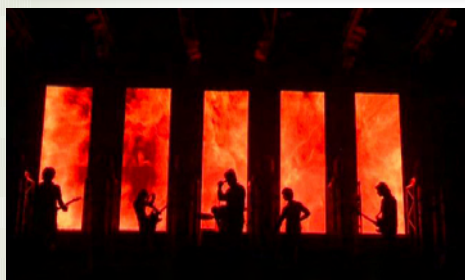
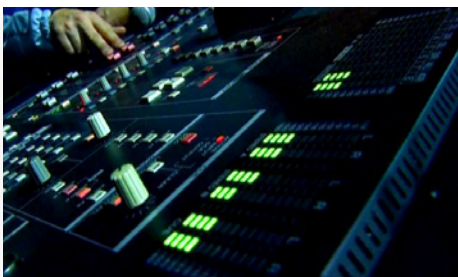
Capítulo 12
Camping musical

Capítulo 13
Hospital

Índice | Estadio de Rock

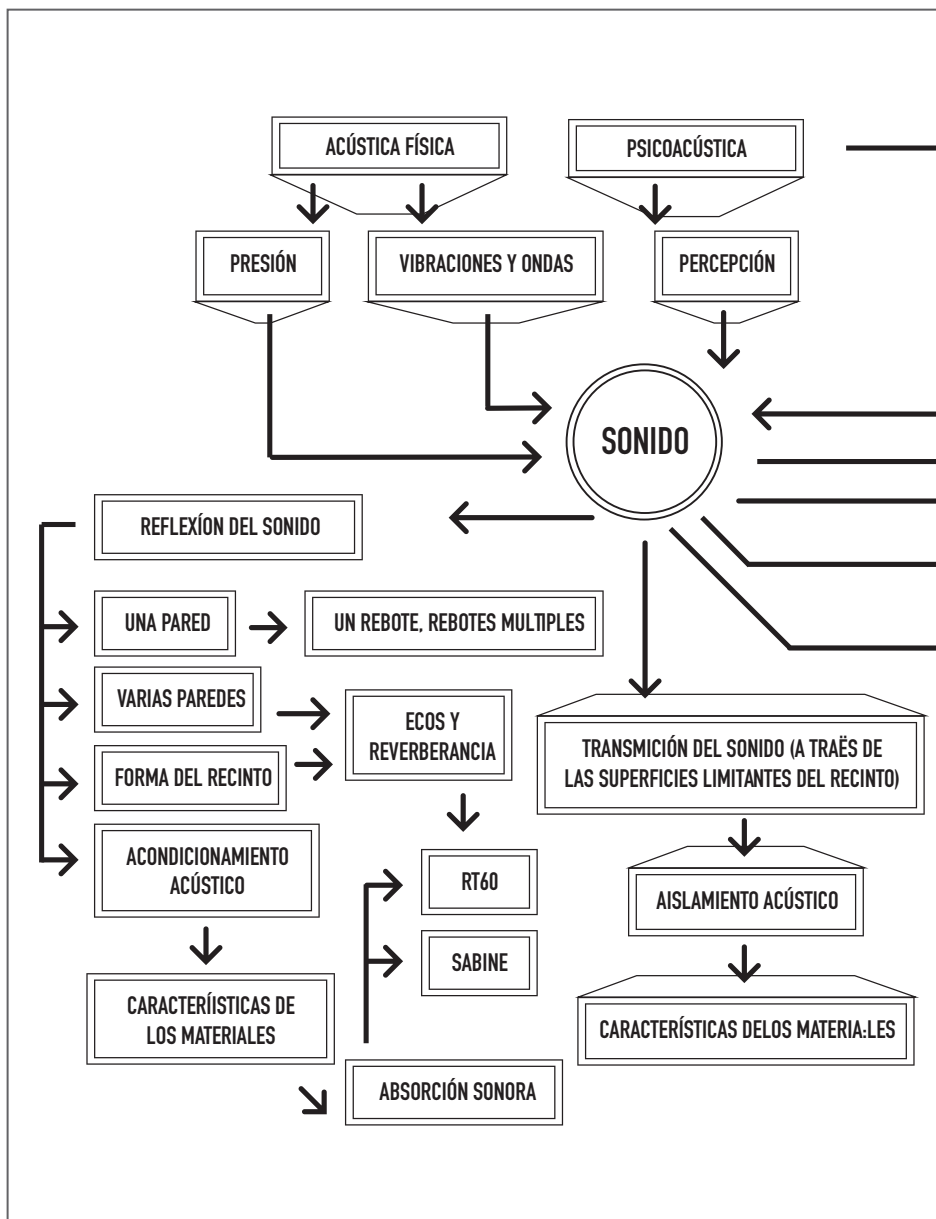
5.1. Red conceptual	08
5.2. Presentación	11
5.3. El sonido	11
5.4. Fuentes sonoras	13
5.5. Descomposición espectral de un sonido	16
5.6. Variación del NPS con la distancia y la potencia	18
5.7. Directividad de altavoces	20
5.8. Respuesta en frecuencia de altavoces	22
5.9. Sonido en recintos cerrados - Reverberación	22
5.10. Sonido en recintos cerrados - Modos de resonancia	26
5.11. Acondicionamiento acústico de recintos	27
5.12. Transmisión del sonido	30
5.13. Efectos del ruido en las personas	32
♦ 5.13.1 Efectos audiológicos	33
♦ 5.13.2 Efectos fisiológicos	35
♦ 5.13.3 Molestias y alteración de comportamiento	36
5.14. Actividades	37
♦ 5.14.1 Características de la señal sonora	37
• 5.14.1.1. Tonos puros	39
• 5.14.1.2. Sonidos compuestos	40
♦ 5.14.2 Relación entre presión en pascales y nivel de presión sonora en decibeles	42
• 5.14.2.1. Nivel de presión sonora (dB)	43
• 5.14.2.2. Relación entre nivel de presión sonora y distancia a la fuente	44
♦ 5.14.3 Velocidad del sonido y retardo temporal	44
• 5.14.3.1. Velocidad del sonido en función de la temperatura	45
• 5.14.3.2. Tiempo de retardo provocado por la velocidad del sonido	46
• 5.14.3.3. Reverberancia y eco	47
5.15. Referencias	49
♦ 5.15.1 Bibliografía	49
♦ 5.15.2 Webgrafía	50

Imágenes del capítulo

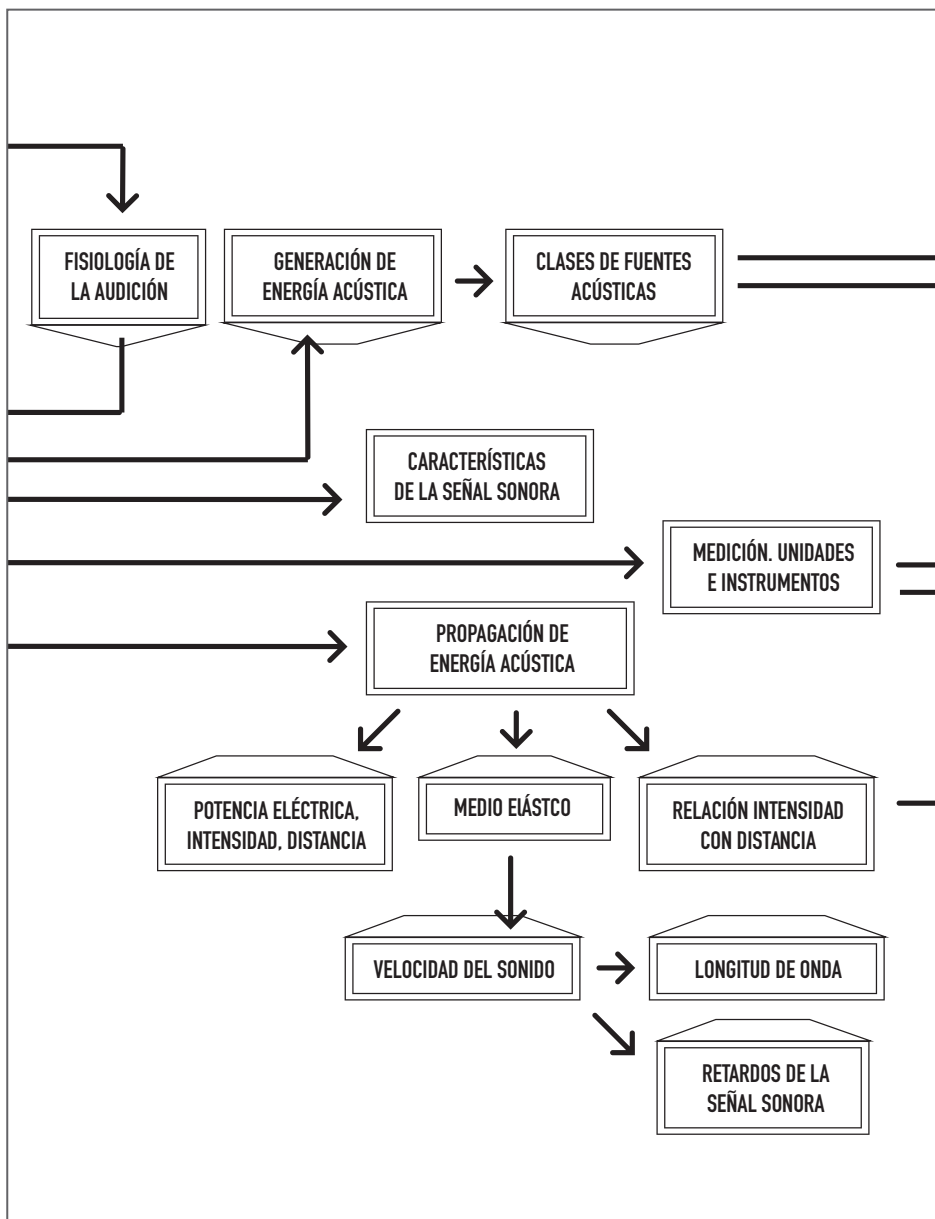


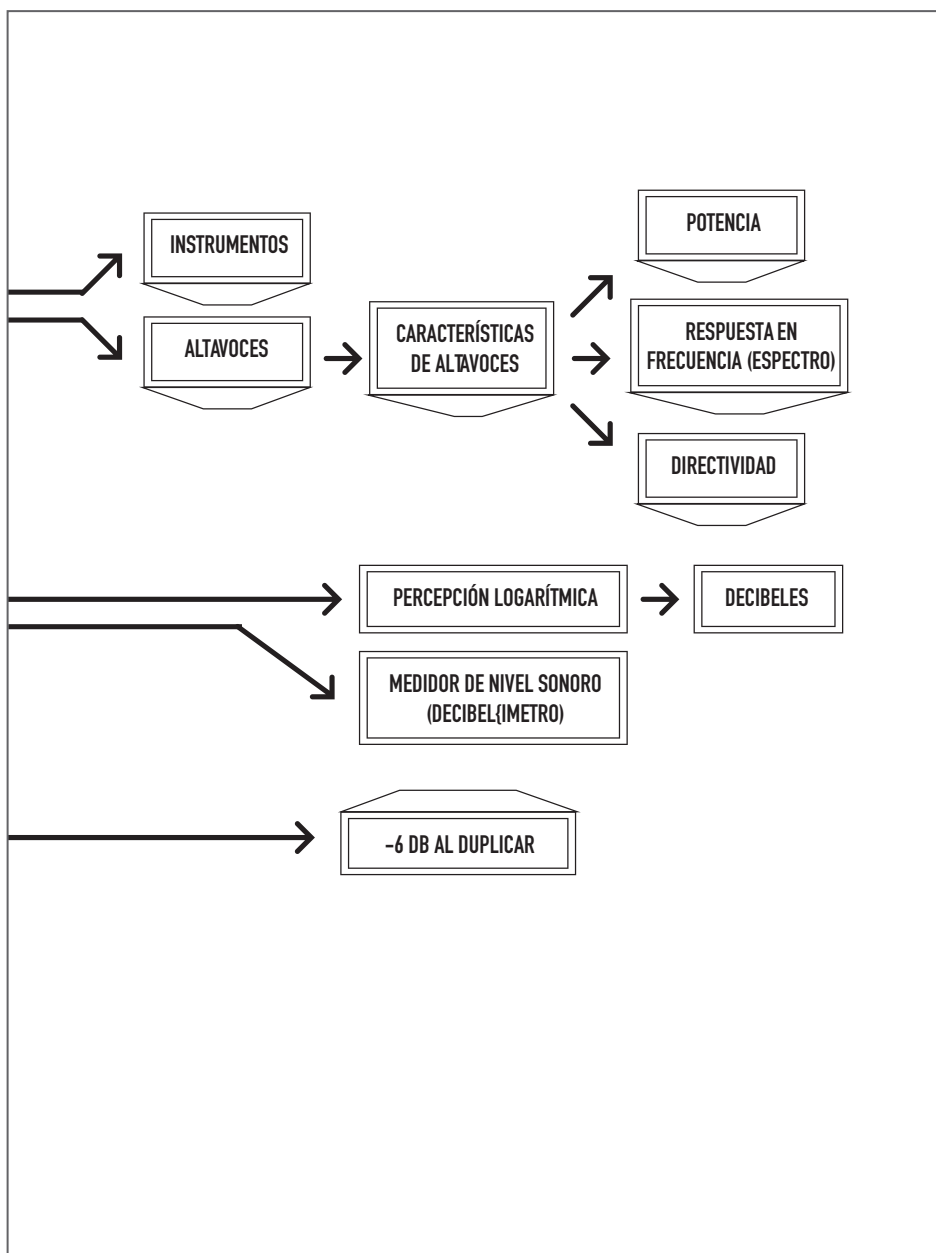
5. Estadio de rock

5.1. Red conceptual



Para visualizar la red conceptual completa haga click aquí »





5.2. Presentación

Un recital de rock puede mirarse desde múltiples puntos de vista: los de un economista, un sociólogo, un físico, un fonaudiólogo, un ingeniero electrónico, un arquitecto, un productor, un músico, entre muchos otros. Cada uno de estos puntos de vista representa un corte del tema que centra la atención en ciertos detalles en desmedro de otros. Esta guía intentará mantener un cierto equilibrio entre los puntos de vista de un físico, un ingeniero electrónico, un arquitecto, un fonaudiólogo y un músico.

Analizar un recital de rock implica revisar aspectos de acústica en cuanto a la generación de sonidos, su amplificación por medios electrónicos, su propagación en ambientes abiertos y cerrados, así como la percepción de las personas que componen el público.

En el programa se muestra un grupo de músicos realizando una ejecución en vivo en un escenario para una cantidad importante de personas.

5.3. El sonido

El término sonido se utiliza normalmente en dos sentidos. Por una parte, designa una sensación percibida por el oído humano -el sonido propiamente dicho-; y por otra, hace referencia a una clase de perturbación mecánica que se propaga la señal acústica.

Algo semejante sucede con el término luz, que puede referirse a algo que se percibe con el sentido de la vista, o a un tipo de ondas electromagnéticas. Si nos centramos en aceptar a la luz como aquello que se percibe con los ojos, sería un contrasentido hablar de luz ultravioleta, o de luz infrarroja, ya que se trata de ondas electromagnéticas invisibles. Así, entonces, el ultrasonido podría ser considerado sonido en el sentido físico, pero no lo sería en el sentido perceptivo. Ciertos animales perciben frecuencias sonoras que están fuera del rango de audición de los seres humanos. Los perros y los murciélagos son capaces de percibir ultrasonidos. Los elefantes pueden percibir infrasonidos.

Desde el punto de vista físico, el sonido se produce por algún elemento vibrante (fuente sonora) que se encuentra inmerso en un medio elástico, de modo que su vibración resulte “contagiosa”. La vibración de la fuente sonora provoca perturbaciones que van propagándose a través del medio elástico con una determinada velocidad.

La figura 1 muestra la distribución espacial de las moléculas del aire en presencia de sonido. El eje horizontal corresponde a la dirección espacial a lo largo de la cual se propaga el sonido. Las distintas franjas corresponden a instantes t distintos. El sonido se propaga desde la izquierda hacia la derecha. En el intervalo de tiempo T (un período) los máximos de presión avanzan, precisamente, una longitud de onda. Se han marcado unas pocas moléculas para ilustrar cómo, a medida que transcurre el tiempo, se propaga la perturbación pero no las moléculas individuales.

En general, el medio elástico que propagará la perturbación será el aire. En condiciones normales de presión y temperatura (presión de 1.013 hectopascales y 13.5 °C de temperatura), la propagación de las perturbaciones de presión del aire provocadas por un elemento vibrante viajan a una velocidad de 340 m/s. Esto significa que recorre casi tres cuerdas y media de distancia por cada segundo que pasa. Es una velocidad alta si se la compara con un automóvil (algo más de 1.224

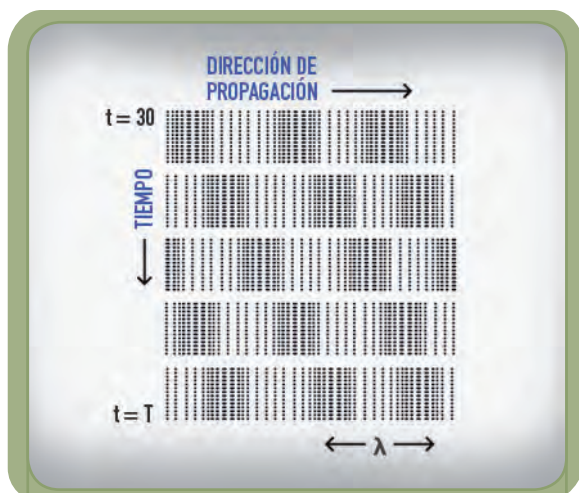


Figura 1. Distribución espacial de una onda sonora en distintos instantes de tiempo

Km/hora), pero es una velocidad muy baja si se la compara con la de la luz (300 mil Km/segundo, o sea 300 millones de metros por cada segundo). Es importante notar que la perturbación se propaga, pero no se propagan de ese modo las moléculas del medio elástico. La velocidad de la que hablamos no implica que exista una corriente de aire de 1.200 Km/hora. Para entender esto, podemos pensar en lo que sucede en una cancha de fútbol cuando los espectadores hacen ese movimiento sincronizado conocido como “la ola”. Allí puede notarse que la ola se mueve a cierta velocidad, aún cuando cada espectador se mantiene sentado en su sitio. Que esa ola recorra toda la cancha en unos pocos segundos no implica que los espectadores deban moverse ellos mismos a esa velocidad.

Prestemos atención a otro aspecto relacionado con la velocidad de propagación. Imaginemos un recital de rock en un gran estadio, de modo que un oyente se encuentre a 100 metros del escenario. Supongamos que en el escenario estalla un petardo. La imagen del estallido llegará al observador en un tiempo ínfimo (la tercera parte de una millonésima de segundo, esto es $3,33 \cdot 10^{-7} \text{s}$), pero el sonido de la explosión tardará casi la tercera parte de un segundo ($0,294 \text{s}$), lo que representa un tiempo de retardo apreciable.

En un gran estadio estos retardos suelen resultar complicados cuando el público pretende seguir con palmas un fragmento musical particularmente rápido. No sólo habrá retardo entre los músicos y el público, sino también entre diferentes personas del público que están alejadas entre sí.

Este retardo entre la imagen y el sonido es un hecho físico relacionado con la velocidad del sonido, que resulta particularmente notorio los días de tormenta con descargas eléctricas. Es posible estimar la distancia a la que se ha producido la descarga contando el tiempo entre el relámpago (destello luminoso provocada por la descarga) y el trueno (sonido generado).

Por ejemplo, si contamos unos diez segundos de retardo entre ambos, entonces la distancia a la descarga será de 3.400 m (3,4 Km).

5.4. Fuentes sonoras

¿Qué características debe tener un elemento vibrante para ser una fuente sonora? Hay dos características centrales para que una vibración sea capaz de generar un sonido. Una tiene que ver con la intensidad de la misma (qué tan fuerte vibra), y la otra tiene que ver con su frecuencia (qué tan rápido vibra).

Si la vibración es demasiado débil, la perturbación provocada no llegará a ser detectada por el oído. En realidad, el mínimo nivel detectable estará dado por la perturbación que llega al oído, y no solamente por la intensidad de la vibración en la fuente. Por lo cual, una vibración determinada podrá ser percibida como sonido a poca distancia, pero podrá dejar de ser detectada a gran distancia.

La presión del aire que nos rodea puede variar de un día para otro. Entre otras variables, depende de la altura a que nos encontremos (no es igual a nivel del mar que en alta montaña) y de la temperatura. La presión normal a nivel del mar es de 1.013 hectopascales, esto es 101.300 pascales¹. La presión atmosférica varía, pero se mantiene alrededor de este valor. Un día de baja presión podrá corresponderse con unos 1.000 hectopascales, y un día de alta presión con unos 1.020 hPa.

Un elemento vibrante provoca una variación local en la presión atmosférica (una perturbación) que hará que el aire que está junto al elemento vibrante aumente y disminuya ligeramente su valor de presión. Esto se asemeja, a lo que sucede con las mareas que provocan que el nivel del mar suba y baje lentamente en forma global, mientras que una piedra arrojada al agua provocará perturbaciones localizadas cerca de la piedra que generarán pequeñas subidas y bajadas por sobre el nivel del agua.

Volviendo al **análisis del sonido en aire**, la mínima perturbación de presión sonora detectable (experimento de laboratorio) es de 20 millonésimas de pascal (20 micropascales). Lo que es realmente muy poco (una pequeña cosquilla) respecto de los 101.300 pascales de la presión ambiente. En realidad, fuera de las condiciones de laboratorio, pueden ser necesarias perturbaciones mayores a 200 millonésimas de pascal para que podamos escucharlas en nuestros ámbitos cotidianos. Pero incluso estos valores son muy pequeños, respecto de la presión ambiente.

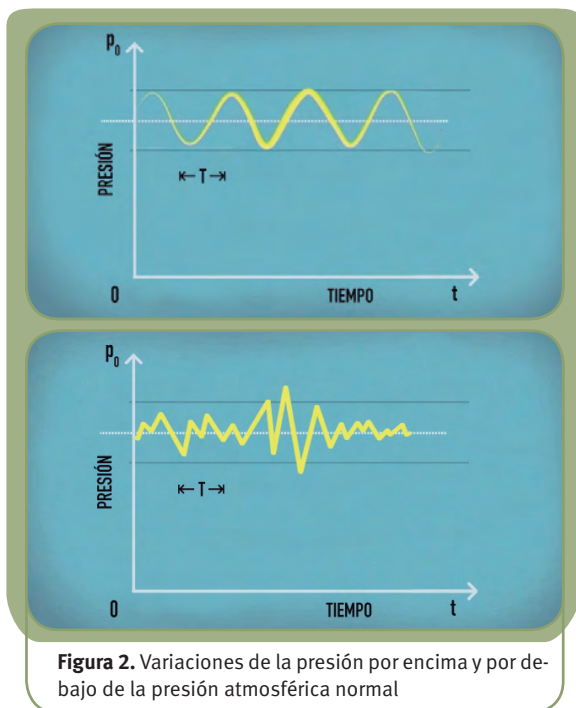


Figura 2. Variaciones de la presión por encima y por debajo de la presión atmosférica normal

¹ El nombre de la unidad "pascales" se debe al físico y filósofo Blaise Pascal.

A medida que la perturbación es mayor, el sonido se escuchará más fuerte. A determinados valores máximos de presión sonora, los sonidos provocan dolor.

El oído percibe las intensidades siguiendo una relación logarítmica. Esto significa que el oído percibe un patrón de variación común entre sonidos que aumentan su presión sonora en una proporción igual (un sonido que pasa de 0,1 pascal a 0,2 pascales; se percibe con una variación similar a otro que pasa de 1 pascal a 2 pascales). Para poder comprender mejor la diferencia, podríamos compararlo con una relación lineal. Entonces, podríamos decir que oímos incrementos de sonoridad diferente entre una señal que pasa de 0,1 pascales a 0,2 pascales, a otra que pasa de 0,5 pascales a 0,6 pascales.

Se considera que un sonido de 20 pascales es suficientemente alto como para provocar dolor. Si la intensidad sonora es aún más alta puede provocar daño. Es común considerar que la exposición a 200 pascales de presión sonora provoca daño inmediato. En los textos se indica que 200 Pa es el umbral de daño. Esto es esencialmente correcto, pero no debe interpretarse en el sentido de considerar que intensidades menores son inofensivas. Toda exposición prolongada a sonidos intensos (incluso moderadamente intensos) va provocando daños irreversibles.

En concordancia con esta característica de la audición, en acústica se define el nivel de presión sonora como una relación que depende del logaritmo de la presión en pascales. La unidad en que se mide el nivel de presión sonora se denomina “decibel NPS”. Es común, cuando el contexto lo permite, hablar solamente de “decibel”.

$$NPS = 20 \log (\text{Presión} / \text{Presión de referencia})$$

De este modo, podemos comparar los valores mencionados anteriormente en una tabla en la que se escriben los valores en Pascales y en decibeles (indicados como dBNPS o lo que es idéntico dBSPL, teniendo en cuenta la designación en inglés de *Sound Pressure Level*). Por ejemplo, una presión de 20 Pascales es lo mismo que un nivel de presión sonora de 120 dBSPL, como surge de calcular $20 \log (20 \text{ Pa}/0,00002 \text{ Pa})$.

	PRESIÓN [Pa]	NIVEL DE PRESIÓN SONORA [dBSPL]
Umbral de daño	200 Pa	140 dB
Umbral de dolor	20 Pa a 63 Pa	120 dB a 130 dB
Martillo neumático	20 Pa	120 dB
Recital de rock o discoteca	6,3 Pa	110 dB
Orquesta sinfónica (fortísimo)	2 Pa	100 dB
Mínimo audible (condiciones de laboratorio)	0.00002 Pa	0 dB

Los decibeles NPS no son la única clase de decibeles utilizados en mediciones técnicas. En acústica, existen también los decibeles IL (*Intensity Level*), que miden el nivel de intensidad sonora, en lugar de nivel de presión sonora. Estos decibeles poseen algunas diferencias con las mediciones ya mencionadas, aunque coinciden en una onda plana para valores normales

de presión y temperatura. Por otro lado, existen también decibeles de tensión eléctrica (como los dBv) y de potencia eléctrica como los dBW, entre otros. Si el contexto de uso está claro, solo se habla de decibeles, sabiendo que en casos necesarios habrá que agregar las siglas que den sentido a la medición.

Los valores que mencionamos se refieren al nivel de intensidad sonora (qué tan fuerte o tan débil es la perturbación que se propaga). Técnicamente se habla de la **amplitud de la onda sonora** para indicar el desvío respecto del nivel de equilibrio de presión. De este modo, aunque la presión del aire nunca puede ser negativa, la presión sonora es en realidad la diferencia entre el valor instantáneo de la perturbación provocada y el nivel promedio de la presión en ese lugar, por lo que el valor instantáneo de la onda de presión sonora tiene valores tanto positivos como negativos (respecto del valor de equilibrio del medio).

Las oscilaciones periódicas (las que tienen formas de onda que se repiten una y otra vez) se perciben como sonidos a los que puede atribuirse una altura tonal, es decir que puede asignarse una determinada afinación. El período de la onda (como puede observarse en la figura que reproducimos inmediatamente arriba del párrafo) es el tiempo que dura cada uno de los fragmentos que se repiten una y otra vez.

El período es el tiempo que tarda en completarse un ciclo completo de vibración. **La frecuencia** es una medida de la cantidad de ciclos completos que se han ejecutado en un tiempo determinado (típicamente en un segundo). Así, una os-

cilación que tenga un período de 1 ms (un milisegundo) completará 1.000 ciclos completos en un segundo y tendrá una frecuencia de 1.000 ciclos/s. La unidad de medida de frecuencia tiene un nombre más técnico Hertz (Hz), pero esto no debe complicar la interpretación, ya que una frecuencia de 1.000 Hz es una frecuencia de 1.000 ciclos/segundo (en algunos ámbitos puede utilizarse esta última forma sin que se considere académicamente incorrecto).

A partir de esta última aclaración, podemos completar la segunda característica que tiene que ver con **límites de percepción auditiva respecto de la frecuencia**. Dijimos que el oído no

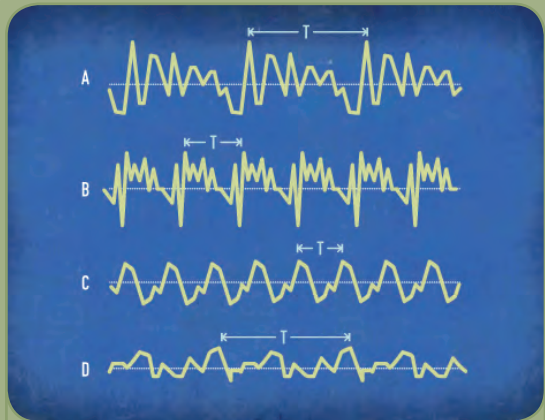


Figura 3. Variaciones de la presión atmosférica ejercidas por a) la voz de un bajo, b) la voz de un soprano, c) una flauta dulce, d) una guitarra. (La escala musical no es la misma para los cuatro sonidos mostrados)

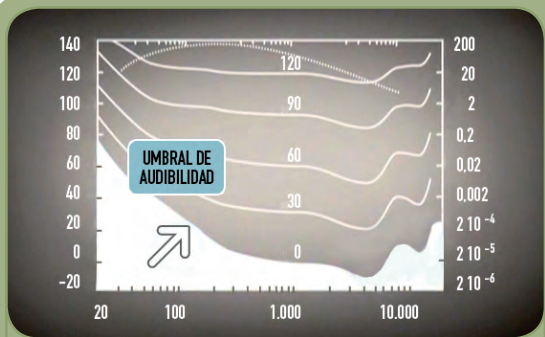


Figura 4. Curvas de sonoridad equivalente para diferentes frecuencias

² Heinrich Rudolf Hertz descubrió la forma de producir y detectar las ondas electromagnéticas.

es capaz de detectar perturbaciones de presión muy débiles, y vimos que resulta inconveniente someterlo a variaciones de presión muy fuertes. De modo semejante, existen límites respecto de la frecuencia de los sonidos que se pueden percibir.

El oído humano puede percibir sonidos provocados por vibraciones de frecuencias mayores a 16 hertz (más rápidas que 16 oscilaciones por segundo) y por vibraciones de frecuencias más lentas que 20 KHz (120 mil ciclos por cada segundo).

Los sonidos de frecuencias mayores a 20 KHz son conocidos con el nombre de ultrasonidos, mientras que los que están por debajo de los 16 Hz se conocen como infrasonidos.

Al reducir el nivel sonoro, la intensidad de los agudos y de los graves disminuye más rápidamente. De manera inversa, al subir el nivel sonoro los agudos y los graves se perciben con mayor detalle. Esto provoca un tipo de comportamiento peligroso desde el punto de vista de la salud auditiva, que consiste en subir exageradamente el nivel sonoro con el argumento de que se “escucha mejor”. La exposición a sonidos intensos produce daños irreparables en el sentido del oído.

El oído no escucha todas las frecuencias por igual. Es más sensible a sonidos de frecuencias cercanas a los 4 KHz. Para que tres sonidos de 100 Hz, de 1KHz y de 10 KHz parezcan tener la misma intensidad es necesario compensar las diferencias de sensibilidad y generar mayor intensidad física a los sonidos de 100 Hz y de 10 KHz. Las siguientes curvas (conocidas como curvas de Fletcher y Munson) aportan información sobre el nivel de presión sonora necesario para que sonidos de diferentes frecuencias parezcan tener igual intensidad desde el punto de vista perceptivo.

En esas curvas se puede ver que cuanto más intenso es el sonido de comparación (por ejemplo, curva indicada con el número 120) la caída en frecuencias medias respecto de graves y agudos es menos pronunciada, con respecto a las curvas que comparan intensidades menores (por ejemplo, la curva que corresponde a 30 dB).

5.5. Descomposición espectral de un sonido

Las oscilaciones producidas por sonidos naturales tienen formas muy variadas. Dos señales pueden tener el mismo período e igual amplitud, pero provocar sensaciones sonoras diferentes (tal como la que podría provocar una nota de guitarra y la misma nota de una flauta). En este caso, se dice que tienen diferente timbre, y existen marcadas diferencias en la forma particular de la onda. Para este caso, interesan las diferencias en la manera en que se desarrolla cada parte del ciclo.

En física, la manera más simple en que un objeto vibra es conocida como “movimiento armónico simple”. Este modo de vibración es el que caracteriza a un péndulo cuando tiene un aparta-



miento pequeño de su posición vertical; al movimiento de un resorte con un extremo fijo al que se deja libre el otro extremo luego de haberlo apartado de su posición de equilibrio; y también al modo en que vibra un diapasón. En todos estos casos la forma de onda que se desarrolla (movimiento armónico simple) es una onda denominada senoidal o sinusoidal.

Una oscilación sinusoidal tiene la forma de onda más simple desde el punto de vista físico. No se trata de una forma de onda fácil de representar ni matemática, ni gráficamente; pero parece corresponderse con el tipo de oscilación más simple de lograr, por lo que los físicos consideran que se trata de un tipo de oscilación básica.

Los científicos han desarrollado modos de descomponer cualquier oscilación compleja en una serie de oscilaciones simples (senoidales) superpuestas. A esta descomposición se la conoce con el nombre de descomposición espectral del sonido, y tiene semejanza con la descomposición espectral de la luz.

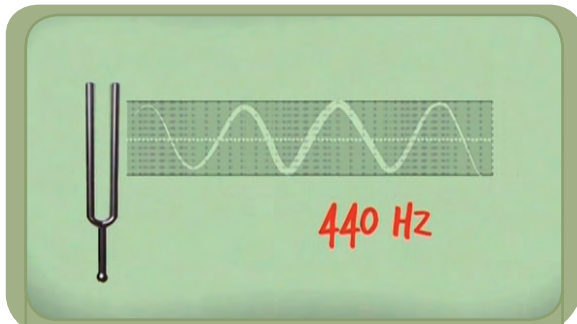


Figura 5. La oscilación de un diapasón genera un movimiento sinusoidal

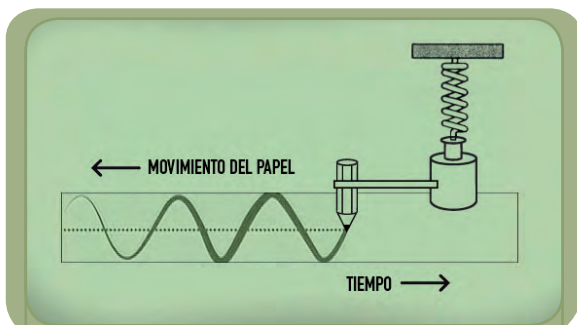


Figura 6. El movimiento de una masa suspendida por un resorte genera una oscilación sinusoidal. (Traducir los términos del gráfico: movimiento del papel, tiempo, y quitar la W de la masa colgante, o bien reemplazarla por la palabra “masa”)

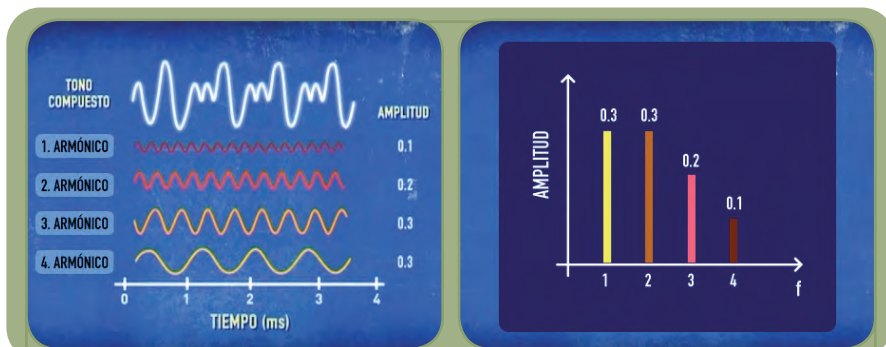


Figura 7. Una onda compuesta puede obtenerse mediante la superposición de varias ondas simples. En la figura de la izquierda se ven: una onda compuesta arriba y debajo de ella cuatro ondas simples que corresponden a su descomposición. En el diagrama de la derecha esta misma información se representa como una serie de líneas (espectro de Fourier)

En esta última, se hace pasar un haz de luz compuesta (blanca, por ejemplo) por un prisma para observar los colores individuales que formaban el rayo complejo original. Una señal periódica cualquiera puede descomponerse mediante procesos matemáticos. El procedimiento matemático que permite calcular las ondas simples que surgen de la descomposición de la señal es el análisis de Fourier, actualmente es un procedimiento estándar de cualquier editor de sonidos basado en computadoras. La descomposición de un sonido en sus componentes simples se presenta normalmente en forma gráfica en un par de ejes, en donde el eje horizontal representa la frecuencia de los componentes y el eje vertical representa la amplitud de cada componente.

5.6. Variación del NPS con la distancia y la potencia

Las fuentes sonoras tienden a generar perturbaciones que se propagan en todas las direcciones (ondas esféricas). Aún suponiendo que las pérdidas de energía por efectos de rozamiento en el aire fuesen despreciables (lo que es razonablemente cierto para recintos de pequeño tamaño o de tamaño medio), de todos modos la intensidad sonora que puede ser percibida varía con la distancia a la fuente sonora. Al aumentar la distancia aumenta la superficie del frente de onda sobre el cual se distribuye la energía sonora. Esto implica una reducción de la intensidad, aún en el caso de que no existan pérdidas. El valor de reducción más sencillo de calcular es el que se da al aire libre. En ese caso el nivel de presión sonora cae 6 decibeles cada vez que se duplica la distancia. Así, si a dos metros de los altavoces se tiene un nivel sonoro de 110 dB, a una distancia de cuatro metros el nivel ha caído a 104 dB, y será necesario alejarse 8 metros para que el nivel caiga a 98 dB.

En un recital de rock conviven instrumentos tradicionales “acústicos” con instrumentos electrónicos.

Un instrumento “acústico” puede generar una intensidad sonora relativamente baja. Una trompeta, si es ejecutada por un músico profesional, puede llegar a generar niveles de presión sonora entre 50 y 90 dB a 2 m de distancia. A unos 16 metros tendríamos entre 32 dB

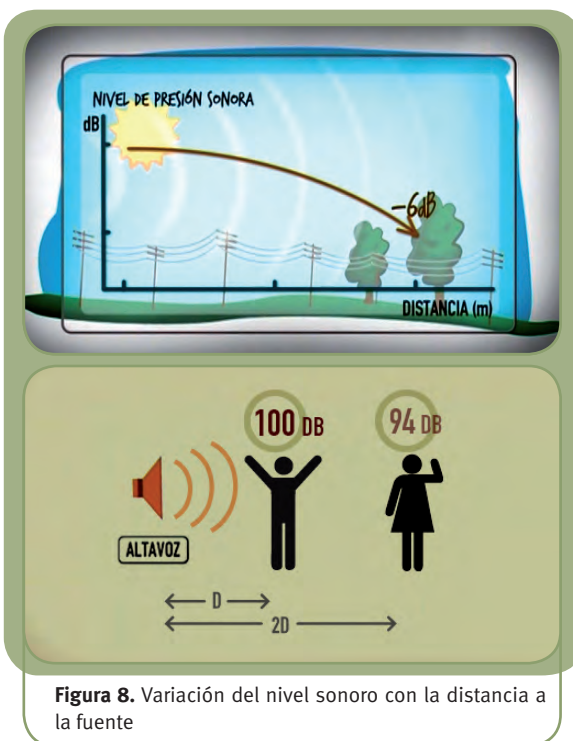


Figura 8. Variación del nivel sonoro con la distancia a la fuente

y 72 dB. Estos valores son extremadamente débiles para resultar útiles en un recital. De modo que los instrumentos acústicos necesitan una amplificación electrónica para lograr que la potencia sonora sea mayor.

Los sistemas de amplificación de audio detectan el sonido producido por un instrumento "acústico" (a través de un micrófono) y generan una copia con mayor intensidad de esas oscilaciones en una membrana elástica, cuyo movimiento está controlado electrónicamente. En otras palabras, logran que el cono del altavoz vibre copiando la forma de onda del sonido que detecta el micrófono, provocando una perturbación sonora con igual forma de onda pero con mayor potencia acústica.

Usualmente, para referirse a la capacidad de un equipo de audio de lograr sonidos intensos se utiliza la potencia eléctrica entregada al sistema de altavoces, que se mide en watts. Un altavoz típico tiene una sensibilidad de 95 dB de nivel de presión sonora cuando se lo alimenta con una señal de 1.000 Hz de un watt de potencia (que se conoce como rms), considerando que la medición se realiza a un metro de distancia. Al alejarnos del altavoz se repite la ley que se mencionó anteriormente, es decir cae el nivel de presión sonora. Al incrementar la potencia eléctrica entregada al altavoz, el nivel de presión sonora aumenta. El ritmo de aumento es de 3 dB cada vez que se duplica la potencia eléctrica, con lo cual es necesario multiplicar por cuatro la potencia para que al duplicar la distancia el nivel sonoro se mantenga igual. Por ejemplo, si nos basamos en los datos anteriores, un altavoz que produce un nivel de 95 dB a un metro, al alimentarse con una potencia de un watt, requerirá cuatro watts para lograr 95 dB a dos metros de distancia.

Con esta aproximación, se puede estimar el nivel de potencia eléctrica necesaria para que el sonido se escuche con un nivel de 95 dB a 32 metros. El razonamiento puede seguirse del siguiente modo: para alcanzar los 32 metros fue necesario duplicar la distancia cinco veces, cada una de esas duplicaciones implicó una caída de 6 dB, con lo que el nivel sonoro detectado a 32 metros sería de 65 dB si la potencia aplicada a los altavoces fuese de 1 watt. Para conseguir subir esos 30 dB, aumentando la potencia, se necesitan 10 duplicaciones (de 3 dB cada una) con lo que se requieren 1.024 watts. Esta ya es una potencia importante para un sistema de audio. Es necesario aclarar que estamos hablando de potencia rms (del inglés *root mean squared* y que corresponde a la potencia equivalente de continua) y no de la potencia pico, conocida como p.m.p.o (del inglés *peak musical power output* que es la que suele aparecer en los avisos publicitarios de equipos hogareños de bajo costo). Un nivel de potencia de 100 watts rms es un nivel exageradamente elevado para un equipo hogareño, mientras que un valor de 100 watts de potencia p.m.p.o. estaría haciendo referencia a un equipo de muy poca potencia, incluso para una casa de familia.

Formalmente, se calculan las variaciones anteriores con la potencia y con la distancia con la siguiente ecuación:

$$NPS_2(dB) = NPS_1(dB) + 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - 20 \cdot \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

donde NPS_1 es el nivel de presión sonora en el punto de comparación inicial (en los cálculos anteriores era 95 dB), P1 es la potencia en dicho punto (1 watt) y d1 es la distancia a dicho punto inicial (1 m).

Los instrumentos electrónicos producen una variación de tensión eléctrica que luego es amplificada para provocar la oscilación del cono de los altavoces que son quienes provocan la onda sonora.

Reemplazando los valores mencionados podemos comprobar la estimación realizada:

$$\text{NPS}_2(\text{dB}) = 95 + 10 \cdot \log \left(\frac{1024}{1} \right) - 20 \cdot \log \left(\frac{32}{1} \right) = 95$$

Se puede hacer la estimación del cálculo anterior aún cuando se utilicen varios altavoces, siempre y cuando los altavoces estén provocando ondas cuyos efectos se superpongan en una misma zona. Más altavoces implica más potencia, manteniendo la ley de que duplicar la potencia en watts implicar aumentar 3dB de nivel de presión sonora.

Una noticia periodística del 21 de febrero de 2006 menciona que los Rolling Stones utilizan un sistema de sonido de 100 mil watts de potencia (para su presentación en el estadio de River). Si suponemos que un altavoz produce 95 dB por cada watt a un metro de distancia, podríamos preguntarnos qué nivel sonoro lograrán 100 Kw a 100 metros de distancia.

$$\text{NPS}_2(\text{dB}) = 95 + 10 \cdot \log \left(\frac{100000}{1} \right) - 20 \cdot \log \left(\frac{100}{1} \right) = 105$$

GIRA MUNDIAL DE UNA BANDA LEGENDARIA : SE CREE QUE EL ESPECTACULO DE BUENOS AIRES SERA MAS LARGO QUE EL DE COPACABANA

Cómo será el concierto que los Stones harán en el Monumental

Guillermo Boerr.
gboerr@clarin.com

El show que dieron los Stones el sábado en Copacabana sirve para tener una idea de lo que el público argentino encontrará hoy y el jueves en el estadio de River. Sin embargo, el escenario y la lista de

Los escenarios usados en Río son los mismos que ahora están en River: uno principal de 22 metros de alto por 57 de ancho, y una pasarela de 55 metros de largo que entra en el público y está rematada por un tablado menor. Las canciones saldrán a través de un **sistema de sonido de 100.000 watts de potencia.**



Figura 9. Artículo periodístico sobre un recital de rock

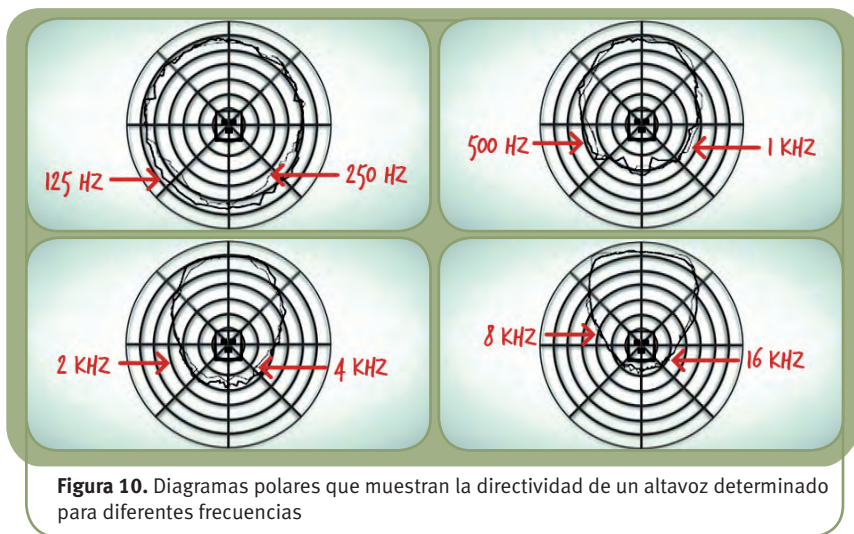
En rigor, sería necesario realizar algunas correcciones a este cálculo debido a que no todos los altavoces están ubicados de modo tal que superpongan sus efectos en la misma zona.

5.7. Directividad de altavoces

Si se coloca un altavoz en una dirección determinada, y luego se realiza un recorrido circular alrededor del mismo (manteniendo una misma distancia) se puede notar que la intensidad del sonido percibido en algunas zonas es mayor que en otras. Este efecto es particularmente notorio con los sonidos más agudos.

Esta característica de los altavoces se conoce como directividad, y hace referencia a la relación entre la energía acústica emitida y la dirección en la que se propaga el sonido.

La directividad se representa en **diagramas polares**, en los que se traza un contorno que muestra el recorrido que habría que hacer alrededor del altavoz para conseguir un mismo nivel de presión sonora. Como puede verse en los diagramas polares representados, el contorno es diferente para distintas frecuencias. Para altas frecuencias la energía acústica emitida hacia el frente es mucho mayor que hacia los lados y hacia atrás. Esto significa que los sonidos agudos son más **direccionales**.



Al colocar altavoces es necesario planificar su ubicación de modo que sus patrones de directividad (sus diagramas polares) cubran adecuadamente las zonas en las que estarán los espectadores. Hay que tener en cuenta que en las zonas donde se superpongan los efectos de varios altavoces, el nivel de presión sonora surgirá del efecto combinado de todos ellos.

Sabiendo que el nivel de presión sonora decae con la distancia y que en un gran estadio se necesitan sonidos que recorran decenas a centenas de metros, podríamos pensar en ubicar altavoces a mitad de camino. Sin embargo, al ubicar altavoces en mitad del recorrido, podrían aparecer nuevos problemas debido a la velocidad de propagación del sonido.



Si es necesario utilizar dos altavoces separados por cincuenta metros, resulta imprescindible lograr un retraso temporal en el segundo altavoz, de modo tal que emita su propio sonido justo cuando el del anterior alcanza los cincuenta metros. Además, resulta imprescindible que

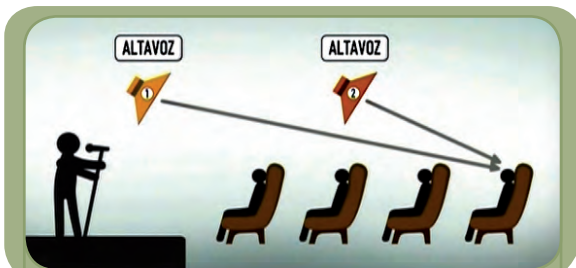


Figura 12. El refuerzo sonoro con altavoces ubicados a diferentes distancias requiere atender al problema del retardo provocado por la velocidad del sonido

sean bien direccionales para que el segundo altavoz no provoque sonidos que viajen hacia la zona del escenario produciendo un eco indeseado en los espectadores que están en esa región.

5.8. Respuesta en frecuencia de altavoces

La función de los altavoces es la de reproducir sonidos, pero la capacidad de generar perturbaciones sonoras depende de la frecuencia. A las características de un altavoz en función de la frecuencia se la conoce como diagrama de respuesta en frecuencia. En general, resulta algo difícil lograr que un parlante responda a un gran rango de frecuencias de modo razonable, por lo cual es común separar los grupos de frecuencias a emitir en distintos rangos. De este modo, se habla de un sistema de tres vías, en el que se utilizarán equipos diferentes para graves,

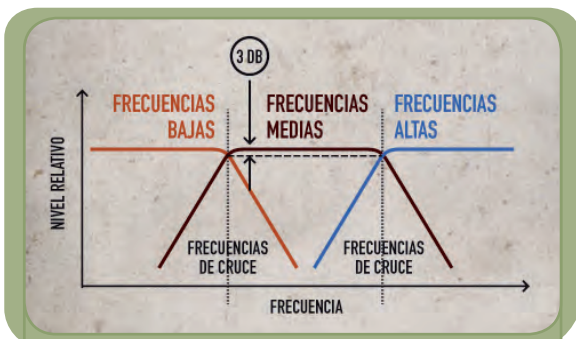


Figura 13. Respuesta en frecuencia idealizada para un sistema de altavoces de tres vías

medios y agudos. En principio, podríamos decir que el tamaño del cono del parlante tiene relación con el tipo de frecuencias que es capaz de reproducir con mayor fidelidad. La relación es inversa con la frecuencia (y directa con la longitud de onda). Así, los sonidos graves requieren un gran diámetro de altavoz, mientras que los sonidos agudos utilizan diámetros menores.

Un sistema de tres vías trabaja con altavoces diferentes para lograr cubrir el rango de frecuencias de la audición humana.

5.9. Sonido en recintos cerrados - Reverberación

En un recinto cerrado las ondas sonoras se reflejan en las superficies que encuentran a su paso. Estas reflexiones se comportan como copias atenuadas y retardadas del sonido original. Una señal acústica que pase cerca de un oyente y continúe su viaje hasta un gran paredón alejado (digamos unos cincuenta metros) llegará a éste unas 15 centésimas de segundo

después, allí se reflejará y regresará hacia el oyente luego de otras 15 centésimas de segundo. Así, el oyente oír un sonido y una repetición de ese mismo sonido unos 0,3 segundos más tarde. Esto se oye como un eco.

Si el oyente está ubicado entre dos paredes, se producirán reflexiones sucesivas entre las mismas, de modo que aparecerán copias repetidas una y otra vez.

Las reflexiones se producen siempre, entonces... ¿por qué no escuchamos ecos todo el tiempo? Porque para poder percibir una reflexión como un sonido diferente (una copia retardada) es necesario que exista una separación temporal suficiente entre el original y la copia. Si no existe esa separación, el sentido de la audición no percibe la reflexión como un nuevo estímulo sonoro y funde la percepción de ambos sonidos en uno solo.

Se necesitan más de 50 milisegundos de retardo para reconocer una reflexión independiente, pero este valor depende de demasiadas variables para considerarse un resultado final. Ante el mismo retardo temporal, la reflexión de un golpe seco puede distinguirse de manera fácil que la reflexión de un sonido de flauta dulce.

En un recinto cerrado por completo aparecen reflexiones múltiples inmediatamente después del sonido directo. La separación temporal entre reflexiones dependerá de las dimensiones del recinto (alto, ancho y largo en el caso de un recinto rectangular). En cada reflexión se pierde algo de energía acústica. Si comparamos una primera reflexión con otra que llegue al oído luego de varios rebotes, podemos decir que la que llega después de múltiples rebotes tendrá menor intensidad debido a la cantidad de interacciones contra las superficies y a que la distancia total recorrida es mayor.

Cuando un sonido se produce en un recinto de dimensiones moderadas, las reflexiones se producen con un retardo temporal demasiado pequeño para ser detectadas como ecos. El cerebro percibe este efecto de reflexiones superpuestas como una sensación de espacialidad. Es lo que se oye en el gimnasio de un club o de una escuela, o lo que se percibe en un antiguo templo o iglesia. En esos casos, el sonido resultante tiene el sello del lugar en el que estamos. Esto se conoce como reverberación. Un cuarto de baño cubierto con superficies altamente reflectantes (como azulejos o cerámicos) provoca reflexiones repetidas de esta clase, generando alta reverberación.

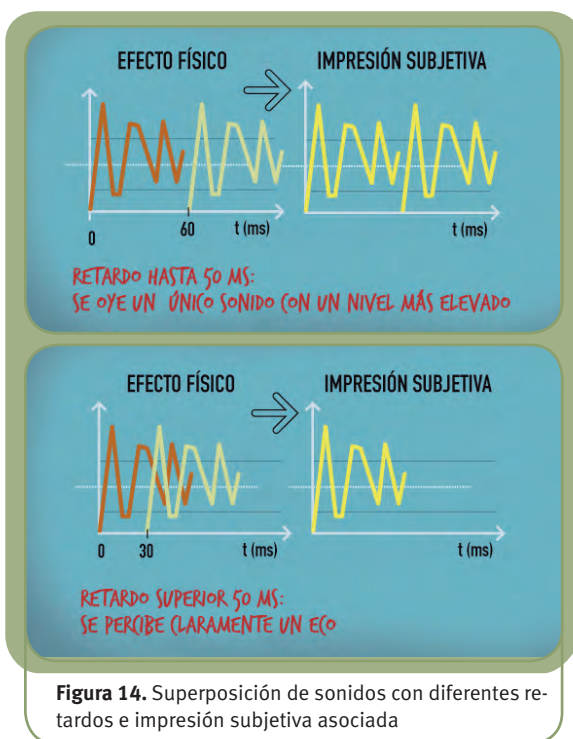


Figura 14. Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada

sean bien direccionales para que el segundo altavoz no provoque sonidos que viajen hacia la zona del escenario provocando un eco indeseado en los espectadores que están en esa región.

Si una persona golpea las manos fuertemente en un recinto reverberante, notará que el sonido tarda en extinguirse. El **tiempo de reverberación** o TR_{60} (o simplemente T_{60}) es un parámetro técnico que caracteriza acústicamente a los recintos. Corresponde al tiempo que se necesita para que un sonido presente en un recinto (por ejemplo un ruido constante) disminuya su intensidad en 60 dB luego de que se apaga la fuente sonora. El golpe de manos no respeta la definición técnica precisa, pero da una estimación razonable y rápida del TR_{60} .

Un elevado nivel de reverberación provoca confusión en la interpretación de palabras (escasa inteligibilidad de las mismas). La solución tecnológica al problema de lograr que una gran cantidad de personas atendieran a una sola persona hablando (un sacerdote) sin disponer de métodos de amplificación electrónica fue la de construir espacios arquitectónicos muy reverberantes. Esto incrementa el nivel sonoro percibido mediante múltiples reflexiones que hacen más confusa la interpretación de lo que se dice. Para evitar este problema es necesario hablar muy pausadamente (como es esperable en un sermón dominical). Característica que también agregó su sello en la música que se ejecutaba en esos espacios. Resulta imposible ejecutar un solo de guitarra eléctrica en un espacio muy reverberante y pretender claridad en lo que se percibe.

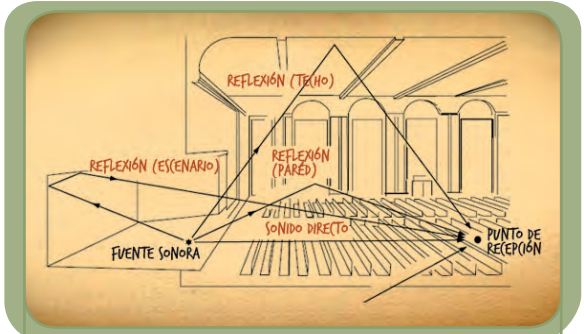


Figura 15. Diferentes reflexiones generadas en el interior de un recinto

Se conoce como sonido seco a un sonido sin reverberación, y se habla de una sala seca cuando en ella no se produce reverberación. Una sala "viva", por el contrario, es aquella que posee mucha reverberación. Por lo general, las salas típicas poseen un TR_{60} menor a un segundo, pero una sala especialmente reverberante (una inmensa catedral, por ejemplo) puede llegar tener un tiempo de reverberación mayor a cinco segundos.

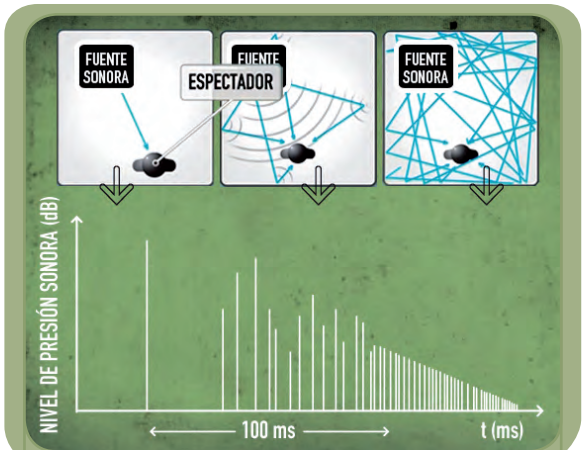


Figura 16. Representación esquemática del modo en que se superponen los efectos de las sucesivas reflexiones. El sonido directo es el que llega primero al receptor, le siguen las reflexiones provocadas del sonido directo en las paredes del recinto, por último llega una andanada de reflexiones de las reflexiones, con niveles que van disminuyendo con el tiempo

Existen análisis realizados por especialistas (con fuerte dependencia cultural y estética) que sugieren determinados valores de TR_{60} para escuchar ciertos tipos de música en determinadas salas.

Es posible disminuir un valor de TR_{60} elevado en un recinto agregando superficies absorbentes. Así, cuanto más energía absorba una superficie, menor será la energía de sus reflexiones, y por lo tanto el sonido se extinguirá más rápidamente. **Una característica importante de los materiales desde el punto de vista acústico es su coeficiente de absorción** (α , letra

griega alfa) que surge de dividir la energía absorbida respecto de la energía incidente. Un coeficiente $\alpha = 0$ corresponde a un material que refleja completamente el sonido, mientras que $\alpha = 1$ indica un material que absorbe toda la energía recibida.

Wallace Clement Sabine encontró, hace poco más de 100 años, una relación entre la calidad acústica, el volumen de un recinto y la capacidad de absorber sonido por parte de los materiales utilizados. Relación que hoy en día se sigue utilizando, aunque existen algunas versiones con leves correcciones.

Relación de Sabine:

$$TR_{60} = 0,161 \cdot \frac{\text{Volumen}}{S_a}$$

El Volumen corresponde a los metros cúbicos del recinto cerrado. El valor de S_a se denomina absorción total del recinto y se calcula como la suma de las áreas de los distintos materiales que cubren piso, paredes y techo, multiplicadas por sus respectivos coeficientes de absorción.

$$S_a = \sum_n \alpha_n \cdot S = \alpha_{11} \cdot S + \alpha_{22} \cdot S + \dots$$

Agregar cortinas gruesas puede disminuir el TR_{60} , pero sin el asesoramiento adecuado puede convertir al recinto en una bomba de tiempo, dado que un material no especialmente acondicionado resulta riesgoso respecto de incendios, tanto por la facilidad con la que puede encenderse, como por el tipo de toxicidad provocada por su combustión. Los materiales acústicos no solamente deben tener las características acústicas deseadas, sino que además deben ser seguros desde todo punto de vista.

La relación de Sabine funciona más adecuadamente cuando la distribución de materiales absorbentes en el recinto es variada, en lugar de concentrarse en un solo sector.

Se suele considerar a Sabine como el padre de la acústica arquitectónica. Durante algunos años su teoría de la reverberación fue la única herramienta para determinar la bondad acústica de un recinto. La experiencia demostró que muchos recintos construidos o reformados para lograr tiempos de reverberación adecuados no tenían la calidad acústica que cabía esperar si se tratase del único parámetro importante. La cuestión es que un buen recinto desde el punto de vista acústico debe tener un TR_{60} adecuado, pero lo contrario no necesariamente

TIPO DE SALA	TR_{60} SALA OCUPADA (EN S)
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 1,2
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Teatro de ópera	1,2 - 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 - 2,0
Iglesia - Catedral (órgano y canto coral)	2,0 - 3,0
Locutorio de la radio	0,2 - 0,4

es cierto (condición necesaria, no suficiente). Esto es, puede existir un recinto con un TR_{60} adecuado, pero que resulte ser malo desde el punto de vista acústico.

5.10. Sonido en recintos cerrados - Modos de resonancia



Figura 17. Para analizar el comportamiento acústico de una sala deben realizarse mediciones utilizando equipamiento adecuado

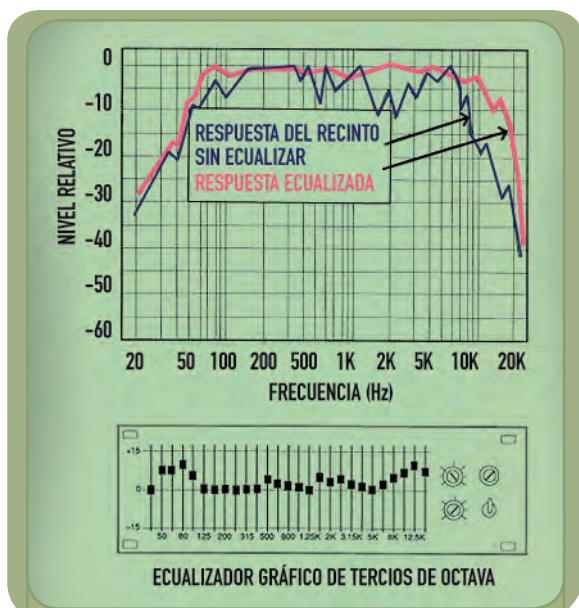


Figura 18. Un ecualizador gráfico permite modificar la respuesta en frecuencias del sonido amplificado en un recinto

En acústica se sabe que una cuerda y un tubo tienen cierta tendencia a vibrar en determinadas frecuencias que se conocen como frecuencias naturales. Una hamaca tiende a oscilar con un ritmo propio, que depende de la longitud de su cadena. Un niño o niña, para hamacarse en ella, deben ser capaces de seguir el ritmo de la hamaca, más que intentar imponer un ritmo propio. De modo semejante, una cuerda estirada tiende a oscilar en su propia frecuencia (y en múltiplos enteros de ella), que depende de la masa de la cuerda, de la tensión y de la longitud total de la cuerda estirada. Un tubo posee ciertas frecuencias preferenciales que dependen de su longitud. Así, tubos más cortos tienen frecuencias de resonancia natural más agudas. Una flauta posee orificios que se tapan y destapan para modificar las oscilaciones naturales que se producirían en un tubo común.

Las cajas de resonancia de los instrumentos musicales tienen dimensiones calculadas para reforzar ciertos valores de frecuencia que dependen de las dimensiones de la caja. De un modo semejante, un recinto rectangular cerrado actúa como una inmensa caja de resonancia. Esto provoca un tipo de ecualización en el espectro de los sonidos que se perciben dentro del mismo. Si un sonido posee una frecuencia que coincide con una resonancia del recinto, se verá favorecida. Mientras que una frecuencia que no coincida se verá atenuada. Esto provocará diferencias en lo que se

percibe dentro de la sala, como si alguien hubiese alterado las componentes del espectro del sonido. En el caso de que se produzca una alteración, se dice que la sala colorea al sonido, relacionando la idea de color con las alteraciones del nivel de cada color que compone el color blanco al hablar de luz.

En los diagramas puede observarse el modo de medir la respuesta en frecuencia de un sistema de altavoces en un determinado recinto, medido desde las butacas del público. Además, se muestra un ecualizador de tercios de octava que intenta compensar la coloración provocada por el sistema de altavoces y el recinto.

Las dimensiones de una sala deben respetar ciertas reglas para que los modos naturales de resonancia no atenten contra la calidad acústica de lo que se escucha en su interior. Se suele utilizar un criterio internacional, propuesto por un ingeniero argentino, que se conoce como criterio de Bonello, cuya aplicación es algo complicada para ser descripta en este contexto, pero lo que propone es calcular las frecuencias de los modos de resonancia más graves de un recinto y analizar la densidad de modos (que tan juntos están entre sí) cuando se consideran intervalos de tercios de octavas.

El criterio de Bonello dice que si el número de modos por tercio de octava se mantiene constante o va creciendo al crecer la frecuencia, entonces la sala es acústicamente adecuada desde el punto de vista de los modos.

Teniendo en cuenta el RT_{60} , el criterio de Bonello y una serie de consideraciones adicionales es posible diseñar o reformar recintos acústicos cerrados para que resulten adecuados desde el punto de vista acústico; pero estos criterios solo resultan útiles para recintos de tamaño pequeño o tamaño medio.

Dicho en otras palabras, cualquier especialista en acústica puede lograr resultados razonables en recintos cerrados pequeños o medianos; pero se necesita un tipo de experiencia adicional (y algo de suerte) para lograr un diseño acústicamente bueno de un recinto grande. En general, es común basarse en diseños que funcionaron previamente y hacerle a éstos algunas reformas. Un tipo de recinto que ha tenido mucho éxito como sala de conciertos es el de forma de herradura (como es el caso del Teatro Colón).

5.11. Acondicionamiento acústico de recintos

El éxito en el diseño acústico de un recinto, una vez determinado su volumen y definidas sus formas, exige revestirlo de materiales seleccionados correctamente para lograr tiempos de reverberación adecuados.

En algunos espacios, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones (como se prefiere en teatros y salas de conciertos), o bien conseguir una buena difusión del sonido (como en salas de conciertos).

Los diferentes tipos de materiales y elementos utilizados en el acondicionamiento acústico producen, principalmente, alguno de los siguientes efectos sobre la energía sonora:

- Absorción del sonido: para evitar que la energía sonora se refleje, esto puede depender de la frecuencia del sonido.
- Reflexión del sonido: para conseguir reflejar el sonido en forma preferencial en alguna dirección.
- Difusión del sonido: para distribuir el sonido de forma uniforme en todas direcciones, evitando el reflejo directo.
- Con respecto a los materiales y elementos utilizados podríamos decir que todos tienden a absorber sonido, aunque el nivel de absorción sea diferente. En orden decreciente en cuanto a la absorción del sonido, podemos citar: El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes (materiales porosos) y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto .
- Todas aquellas superficies límite de la sala susceptibles de entrar en vibración (puertas, ventanas y paredes separadoras livianas).
- El aire.
- Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (hormigón).

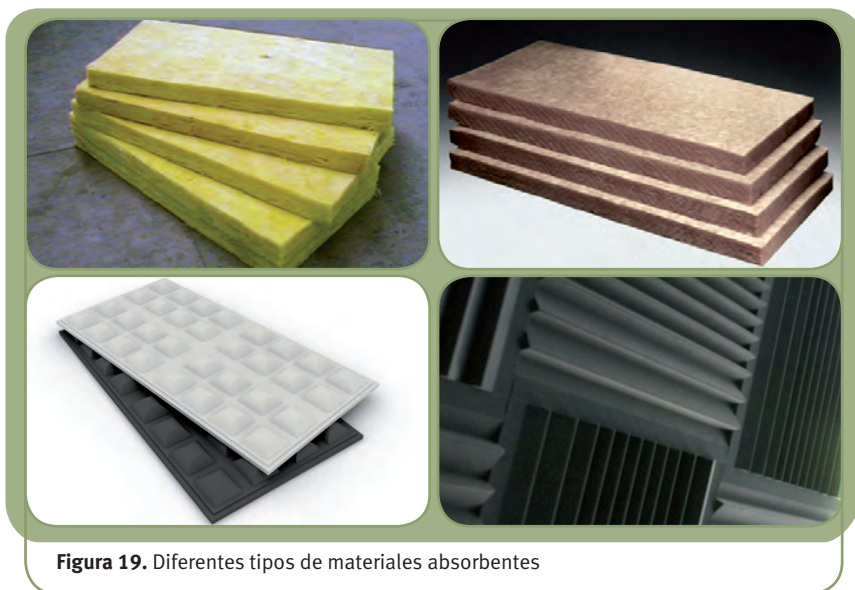


Figura 19. Diferentes tipos de materiales absorbentes

Tanto los resonadores de membrana (que involucran una placa preparada para oscilar en determinado rango de frecuencias) como los de cavidad (placa con orificios y capacidad de disponer de un volumen de aire en su interior) absorben energía acústica de determinadas frecuencias, que puede seleccionarse en función de las características físicas del elemento resonador.

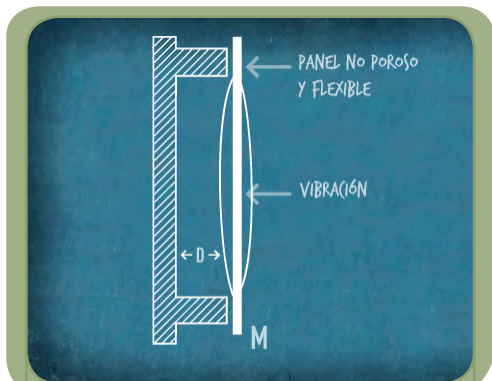


Figura 20. Esquema básico de un resonador de membrana o diafragmático

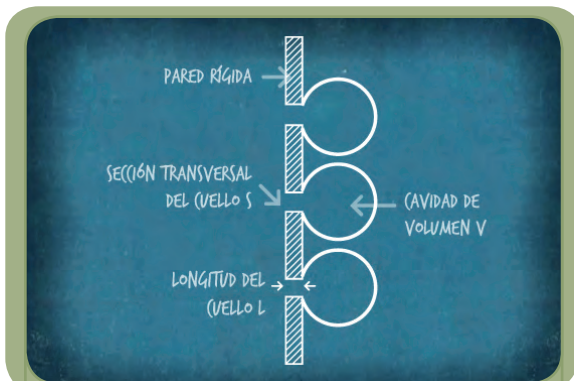


Figura 21. Esquema básico de agrupación de resonadores simples de cavidad (Helmholtz) colocados en una pared

Tanto los resonadores de membrana (que involucran una placa preparada para oscilar en determinado rango de frecuencias) como los de cavidad (placa con orificios y capacidad de disponer de un volumen de aire en su interior) absorben energía acústica de determinadas frecuencias, que puede seleccionarse en función de las características físicas del elemento resonador.

Los reflectores cumplen el papel de “espejos acústicos”. Existen paneles convexos, planos o cóncavos. La utilización de los mismos dependerá del tipo de reflexión de ondas que se pretenda conseguir.

Los difusores son materiales que buscan lograr que la reflexión no sea especular sino difusa. En lugar de que la energía acústica se refleje manteniendo el ángulo con el que incide a dicho material, consiguen que la energía se disperse abriéndose en un abanico de gran rango como puede verse en la figura.

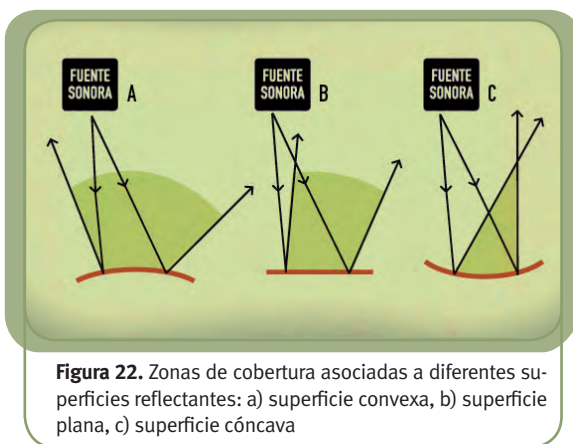


Figura 22. Zonas de cobertura asociadas a diferentes superficies reflectantes: a) superficie convexa, b) superficie plana, c) superficie cóncava

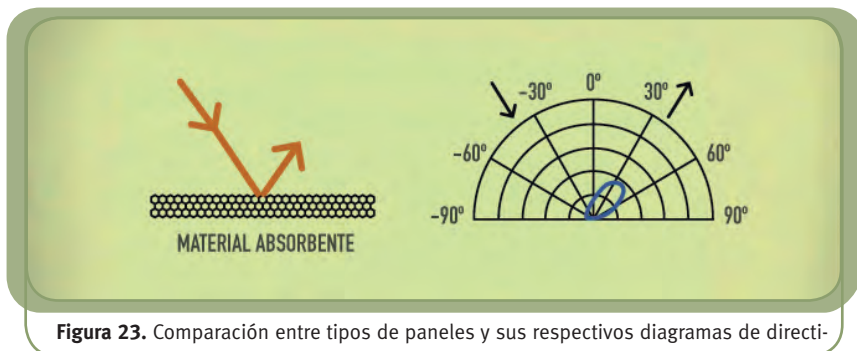
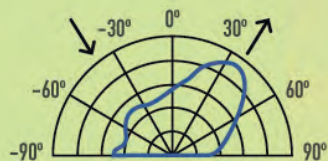


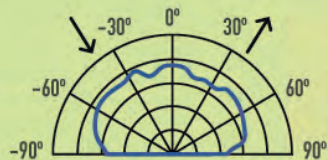
Figura 23. Comparación entre tipos de paneles y sus respectivos diagramas de directi-



REFRACTOR



DIFUSOR



vidad. El panel absorbente refleja la onda con bastante menos energía de la inicial. El panel reflector genera una reflexión con un ángulo de reflexión semejante al que podría esperarse de un “espejo acústico” y con muy poca pérdida de energía. El panel difusor, refleja casi toda la energía que recibe pero lo hace en todas direcciones (de modo muy diferente a lo que se esperaría de un “espejo acústico”)

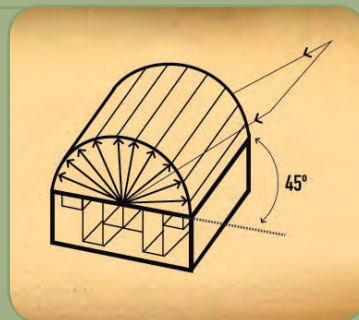


Figura 24. Paneles difusores

5.12. Transmisión del sonido

Lo analizado hasta aquí hace referencia a lo que sucede dentro de un recinto cerrado.

Ahora consideraremos la influencia que un sonido generado dentro de un recinto provoca fuera de este. Dicho en palabras sencillas, cuánto molestamos a los vecinos.

El aislamiento acústico es diferente del acondicionamiento acústico. Existen modos de mejorar el aislamiento que no mejoran las características acústicas del recinto, y viceversa. Por ejemplo, si deseamos que el sonido de un recinto no salga fuera de él podemos tratar que

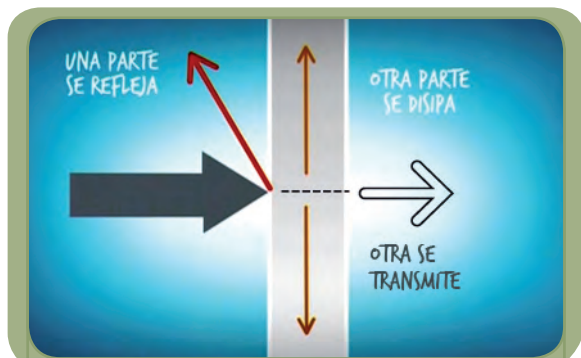


Figura 25. Esquema que muestra las posibles trayectorias de la energía incidente, luego de interactuar con la superficie

toda la energía sonora se consuma al atravesar la superficie de sus paredes, o podemos intentar que se refleje tanto en el interior, que no llegue a salir al exterior. La primera solución requiere paredes absorbentes y de gran masa, mientras que la segunda necesita superficies reflectantes en el interior (como en un cuarto de baño).

Generalmente, se desea aislar acústicamente un recinto por dos motivos: porque necesitamos evitar que los sonidos externos ingresen al interior del recinto (como en un estudio de grabación en una gran ciudad), o porque se desea evitar que el sonido producido en el interior salga al exterior (sala de ensayos o sala de espectáculos musicales). En este último caso, la prioridad es no sobrepasar un cierto nivel de presión sonora legalmente permitido fuera del recinto.

El parámetro que caracteriza el aislamiento de un determinado material es su pérdida de transmisión (PT) o su aislamiento al ruido (R) que se mide en dB. Un material determinado puede poseer una PT de 30 dB y otro material (quizás sea de la misma clase pero con más espesor) puede poseer una PT de 40 dB. Si uno de los lados de esta pared está expuesto a 80 dB, los valores dados significan que el otro lado tendrá 50 dB o 40 dB respectivamente.

Lo anterior solamente será cierto si no existe ningún otro camino alternativo para llegar de un lado al otro de la pared, y esto casi nunca es cierto.

La medición de pérdidas por transmisión PT debe hacerse en un recinto especialmente diseñado para que todos los caminos alternativos de transmisión del sonido sean despreciables respecto de lo que se está intentando medir.

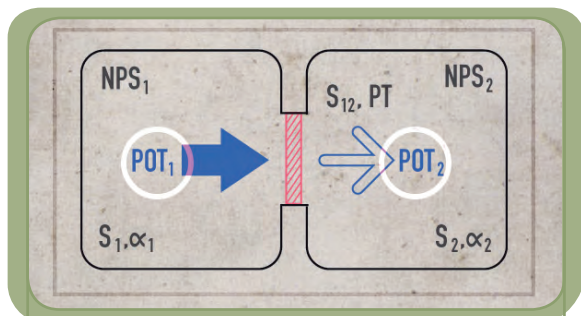


Figura 26. Diagrama esquemático del proceso de medición de la pérdida de transmisión de un material determinado. El material a medir se coloca como tabique de separación entre dos recintos aislados

Para realizar mediciones acústicas la PT en un laboratorio se coloca una muestra del material a medir separando ambos recintos. Se produce un nivel de presión sonora en el recinto emisor y se mide el nivel de presión sonora en el segundo recinto (Ver gráfico siguiente).

La construcción de un recinto con materiales de un nivel de pérdidas por transmisión elevado soluciona el tipo de ruido

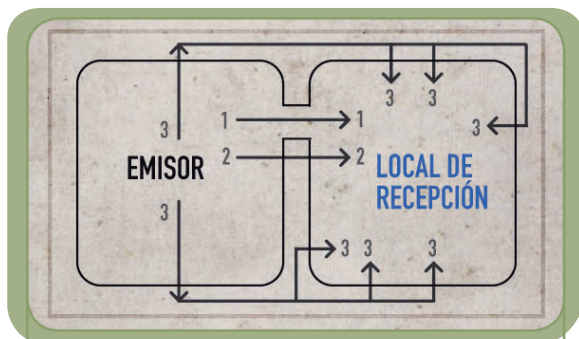


Figura 27. Posibles trayectorias del ruido aéreo al pasar del recinto en donde está la fuente sonora a otra donde se encuentra el receptor

que se conoce como ruido aéreo. Existen muchos caminos por los cuales el ruido aéreo logra llegar al segundo recinto. Cuando estamos ante una situación de ruido aéreo la energía acústica provocará vibraciones en el material de paredes, piso y techo, y esta energía se trasladará al otro lado.

El otro caso es el de ruido de impacto. Cuando estamos ante una situación con este ruido, es el propio impacto el que genera una vibración en el material de paredes, piso y/o techo (salteando un paso). Los ruidos de impacto no son atenuados de modo sencillo

por la utilización de un tabique separador entre recintos. En casos extremos requiere de un aislamiento completo del recinto que se puede lograr montando una sala flotante dentro de otra sala.

Las pérdidas por transmisión de un material dependen de la frecuencia, que los fabricantes indican en forma de curvas o tablas. Las paredes dobles (con separación entre ellas) logran una mayor reducción para algunas zonas de frecuencia.

Cuando ensaya en una sala un conjunto de rock, la ejecución de la batería es una de las fuentes de producción de ruidos de impacto más clásicas (y difíciles de atenuar), por lo que es común subirla a una determinada plataforma aislada del piso. De ese modo sobrevive el ruido aéreo de la propia batería, pero se aíslan las vibraciones, evitando el ruido de impacto.

El ruido de impacto se produce directamente sobre las superficies. Para atenuar estos ruidos se debe separar de forma mecánica la fuente de ruido de la superficie. Una superficie de goma de gran espesor, o una plataforma sostenida mediante materiales elásticos, o un doble piso con resortes entre ambas capas, podrían ser soluciones al problema del ruido de impacto.

5.13. Efectos del ruido en las personas

El sentido de la audición es complejo y delicado. Además de permitir la comunicación oral, aporta información vital sobre un entorno de 360° alrededor de la persona, y no se desactiva al dormir. Por eso, se lo llama sentido del alerta. Quizá nuestras capacidades musicales, que exceden en mucho las necesarias para la comprensión del lenguaje hablado, tengan que ver con esta función del oído como canal de entrada general de información ambiental. Pero, para que una persona pueda desarrollar plenamente sus potencialidades auditivas, debe poseer y conservar un oído sano.

La exposición al ruido puede dañar el mecanismo de la audición y la magnitud del deterioro depende de la energía acústica recibida y, en cierto sentido, el efecto es acumulativo.

Pero no todos los trastornos provocados por el ruido menoscaban nuestra sensibilidad auditiva: algunos afectan la salud general, el rendimiento en el trabajo y degradan la calidad de vida. Los efectos generados por el ruido en las personas pueden clasificarse en tres grandes grupos: efectos audiológicos, efectos fisiológicos, y molestias y alteración del comportamiento.

5.13.1 Efectos audiológicos

Los efectos del ruido sobre el sistema auditivo humano se pueden dividir en incrementos temporarios del umbral de audibilidad (pérdidas temporarias o reversibles) y en incrementos permanentes de dicho umbral (pérdidas irreversibles). Estas últimas pueden ser causadas por la destrucción inmediata de las estructuras físicas del oído, en cuyo caso se denomina trauma acústico, o por el efecto acumulativo de sucesivas exposiciones durante un período relativamente prolongado.

El incremento temporario del umbral de audibilidad está relacionado con el nivel de presión acústica del ruido -a mayor nivel, en dB, mayor incremento del umbral-, con la frecuencia y el espectro del mismo -cuanto mayor sea la frecuencia, hasta 6.000 Hz, mayor será el incremento-, y con el patrón temporal del ruido -los ruidos intermitentes producen menos pérdidas temporarias que los continuos-.

La sensibilidad auditiva se recupera totalmente recién 48 h después de la supresión de la fuente de ruido. Si una persona, por ejemplo, reactiva dicha fuente a las 8 h de haberla apagado, su umbral será 10 dB mayor que el normal, obligándolo a aumentar 10 dB la potencia de la fuente acústica: su oído sentirá multiplicada por diez la energía recibida. Este proceso se realimenta varias veces hasta alcanzar niveles capaces de provocar daños no reversibles.

Los mecanismos fisiológicos involucrados en la pérdida temporaria de la audición son los mismos, salvo una cuestión de grado, que producen la pérdida permanente de la misma.



Figura 28. Pérdidas transitorias de audición provocadas por la exposición a una banda de ruido de una octava centrada en 4 KHz y con un nivel de presión sonora de 85 dB

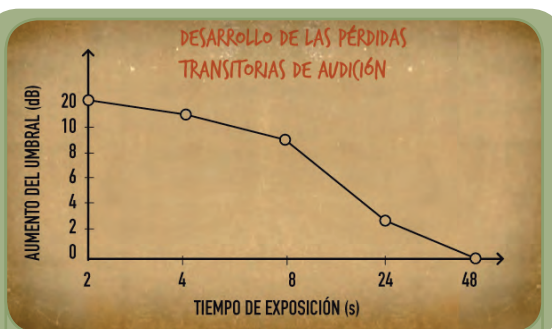


Figura 29. Variación del umbral de audición durante la recuperación posterior a la exposición a una banda de ruido de una octava centrada en 4 KHz y con un nivel de presión sonora de 85 dB

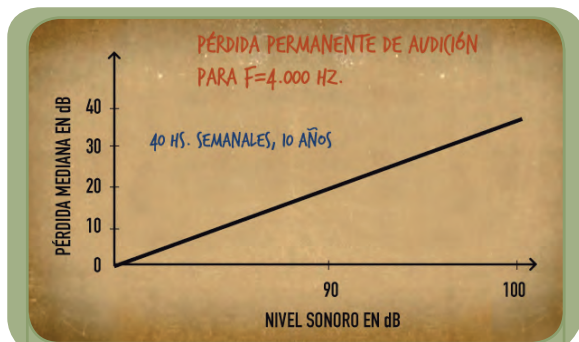


Figura 30. Pérdidas permanentes de audición provocadas por una exposición continua a distintos niveles sonoros durante un período de 10 años



Figura 31



Figura 32

El conocimiento que poseemos del *incremento permanente del umbral de audibilidad* se basa en estudios realizados en industrias y en experimentos con animales. De ellos se desprende que existe una relación aproximadamente lineal entre las pérdidas de sensibilidad y el nivel sonoro de la exposición por encima de los 80 dB(A), tal como se observa en la figura 30. Se considera que los niveles inferiores a 75 dB(A) no producen efectos nocivos.

La relación entre el tiempo de exposición y la variación espectral de las pérdidas es más compleja. Es común que aparezca durante los primeros años una disminución de la sensibilidad alrededor de los 4.000 Hz, ampliándose con el correr del tiempo a la banda comprendida entre los 3.000 y los 6.000 Hz. Este proceso se muestra en la figura 31.

Si representamos el incremento del umbral en función del tiempo de exposición tomando la frecuencia como parámetro, vemos que las más altas (3.000 y 4.000 Hz) son afectadas en los primeros años de exposición, mientras que las menores (1.000 y 2.000 Hz) recién alcanzan valores significativos al cabo de 20 años o más.

En los gráficos anteriores se ve con claridad que el oído es más sensible, y por lo tanto más frágil, en la región de altas que en la de bajas frecuencias. En cierta medida, esto es causado por la resonancia del oído externo y las características del sistema de transmisión. Debido a que la inteligibilidad de la palabra

hablada depende de la energía en frecuencias relativamente bajas y que las personas acuden al médico recién cuando tienen dificultades en la comunicación oral, la detección de la hipoacusia provocada por ruido suele resultar tardía.

5.13.2 Efectos fisiológicos

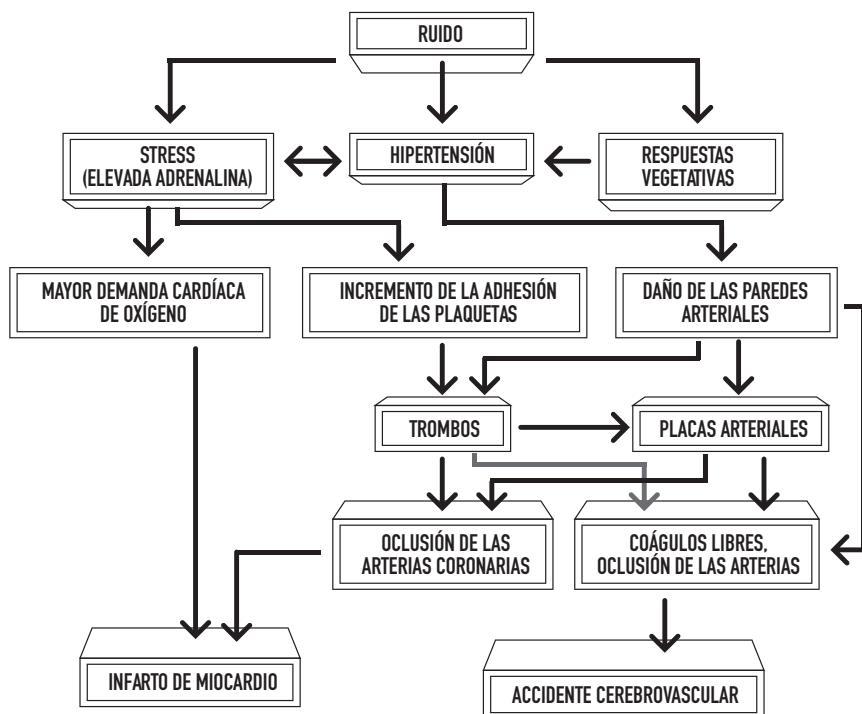
Además de los efectos sobre el sentido de la audición, el ruido produce trastornos fisiológicos que se manifiestan como cambios en el control de los músculos voluntarios, en la transmisión nerviosa a los músculos autónomos y en el comportamiento del sistema simpático que, a través de las catecolaminas (especialmente la adrenalina) regula gran cantidad de funciones fisiológicas.

Los efectos de corta duración se manifiestan en la forma de vasoconstricción, aumento del ritmo cardíaco, aumento del ritmo respiratorio, etc.

Los efectos de larga duración provocan respuestas nerviosas y hormonales que pueden configurar un cuadro de stress generalizado. Esta situación provoca, en determinados individuos, cuadros de gastritis, úlceras, cefaleas, asma, hipertensión arterial, etc.

Si bien no se puede decir que el stress urbano esté causado únicamente por la polución acústica, sí es una de sus causas y, según la susceptibilidad de cada persona, como una de las más importantes. El deterioro de las condiciones del descanso nocturno en las grandes ciudades es especialmente relevante.

La *Environmental Protection Agency* de los Estados Unidos describe las consecuencias posibles de la contaminación por ruido en el siguiente gráfico:



A modo de ejemplo se puede citar un estudio realizado en Francia en 1988, que muestra que trabajadores textiles sometidos durante 5 años a un nivel de presión sonora de 95 dB(A) desarrollaron un porcentaje mucho mayor de hipertensión arterial y de patologías cardíacas que los operarios de la misma fábrica con ocupación en áreas relativamente silenciosas. Es importante destacar, en relación con tema que nos ocupa, que la medida del estímulo acústico dado en decibelios -tal como figura en las normas y legislaciones actuales- no parece estar totalmente correlacionada con los efectos fisiológicos asociados.

5.13.3 Molestias y alteración de comportamiento

El ruido puede provocar molestias, incomodidades y alteraciones de conducta, e incrementar la excitación general del sistema nervioso, sin ser inmediatamente nocivo para la salud corporal. A través del aumento del stress, estos efectos se vinculan con el efecto fisiológico. Las variaciones de sensibilidad individual frente al ruido se muestran mayores en el campo de las consecuencias psicológicas. En la literatura especializada se considera incómodo un ruido cuando un grupo de personas expuestas trata de reducirlo o de abandonar el área afectada. En general, el ruido incrementa la excitación general del sistema nervioso, y tiene las siguientes consecuencias:

- Estimula la *concentración* sobre ciertas fuentes de información o tareas (primarias) en detrimento de otras (secundarias).
- La *memoria* intencional mejora con el ruido, pero la incidental empeora.
- Resulta positivo a bajos niveles porque enmascara la información irrelevante del entorno (es más deseable un débil ruido continuo que el "silencio", por ejemplo, en una sala de lectura).
- Para ejecutar tareas monótonas el ruido fluctuante y de baja correlación es positivo (como la música) a niveles moderados.
- Los efectos nocivos para la actividad se incrementan cuando el ruido alcanza niveles superiores a 95 dB(A), especialmente en alta frecuencia.
- El ruido intenso aumenta la *intolerancia* y la *agresividad* social.
- Los siguientes factores condicionan el grado de las molestias causadas por un ruido:

Factores acústicos:

- A mayor *nivel sonoro*, mayor molestia: para ruidos de igual carácter espectro-temporal, un aumento de 10 dB duplica, aproximadamente, la cantidad de reclamos.
- Las *frecuencias* comprendidas entre los 2.000 y los 8.000 Hz son más molestas (los sonidos agudos son peores que los graves).
- En general, a mayor *duración efectiva* del ruido, mayor incomodidad provocada por el mismo.
- Los *ruidos fluctuantes*, como el de tránsito, son más molestos que los constantes.
- Los *ruidos impulsivos* son peores que los continuos de igual energía total.
- Los *ruidos no localizables* espacialmente son más molestos que los que poseen una fuente bien definida en el espacio.
- Cierta nivel de *ruido ambiente* constante es preferido respecto a un entorno silencioso por la mayoría de las personas, pues permite enmascarar los sonidos intrusos.

Factores no acústicos:

- Muchos ruidos, que aislados del contexto no generan protestas, devienen molestos al ser asociados con eventos molestos (como el torno del dentista o el ruido emitido por una industria contaminante).
- El *acostumbramiento* disminuye la cantidad de quejas ante el mismo estímulo acústico.
- La posibilidad de *control voluntario*, aunque éste no se ejerza, disminuye la incomodidad provocada por un ruido determinado.
- Existe gran dispersión en la sensibilidad de las personas con oídos normales ante el ruido (la variación alcanza a 40 dB(A)).
- La *historia personal* es determinante a la hora de juzgar la tolerancia de un individuo ante determinado ruido.

En este terreno, en especial, las normas estipuladas en valores máximos de dB(A) o dB(C) se muestran insuficientes para caracterizar los efectos del ruido.

5.14. Actividades

5.14.1 Características de la señal sonora

Cuando una oscilación se desarrolla en un medio elástico, produce una perturbación que se propaga generando lo que se conoce como “onda”. Las ondas sonoras son perturbaciones que se propagan en el aire. Las oscilaciones pueden diferir unas de otras en la amplitud de oscilación (que indica cuánto se aparta aquello que oscila del punto de equilibrio), en la frecuencia de oscilación (qué tan frecuentemente se suceden los ciclos de oscilación) y en la forma de onda (de qué modo particular se desarrolla cada ciclo de oscilación).

En una onda sonora cada una de estas características se vincula con algún rasgo perceptivo. La amplitud se relaciona con la intensidad percibida, la frecuencia con el tono (grave o agudo), y la forma de onda con el timbre.

Esta actividad pretende explorar dichas relaciones utilizando, como medio, una computadora con un editor de audio. Si bien podría utilizarse cualquier editor de audio sugerimos bajar de Internet el programa Goldwave porque se puede descargar gratis y porque dispone de una función que permite escribir la ecuación matemática de las ondas que se utilizarán. La descarga está disponible en: **www.goldwave.com** (verificar la versión disponible para el sistema operativo a utilizar). La oscilación más sencilla desde el punto de vista físico, es la que se conoce como sinusoidal o senoidal pura. Es la que corresponde, por ejemplo, al movimiento de una masa unida al extremo de un resorte, o al de un péndulo que se aparta ligeramente de su punto de equilibrio. Se denomina elongación al valor que indica qué tan apartado está aquello que oscila de su punto de equilibrio en cada instante. La amplitud indica el máximo apartamiento. La ecuación que describe la elongación en función del tiempo de una oscilación simple puede expresarse de la siguiente manera:

$$y(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

donde t es la variable independiente (tiempo), y (t) es la variable dependiente (elongación), A es la constante que determina la amplitud de la oscilación, y f es la frecuencia. Es importante aclarar que para calcular punto a punto, en forma manual, la elongación en cada instante con esta ecuación hay que utilizar la función seno en radianes. Este es el motivo por el cual aparece el factor 2π (que convierte ciclos en radianes, ya que cada ciclo equivale a 2π radianes).

Instrucciones para utilizar el editor de audio

Previo a desarrollar la actividad, es necesario familiarizarse con el editor de audio, por lo que indicaremos puntualmente los pasos necesarios para escribir una primera ecuación de oscilación:

- Ejecutar el programa y clicar en el ícono que dice “New” (para iniciar un nuevo sonido).
- Veremos un cuadro indicando datos técnicos. Clickear OK para continuar.
- Aparecerá una ventana con título “Untitled1” con una serie de subdivisiones tanto horizontales como verticales. El eje horizontal corresponde al tiempo y el vertical a la elongación.
- Clickear en el ícono “f(x)” que aparece en la parte superior de la ventana, con el fin de escribir una ecuación de elongación.

• Se abrirá una ventana de título “Expression Evaluator”. En el espacio en blanco con título “Expression”, debemos escribir el lado derecho de la ecuación que deseamos utilizar. Como el programa está en inglés en lugar de “sen” (seno), se utiliza “sin” (sine). El factor π que necesitamos introducir se escribe directamente como “pi”. La escala vertical que el programa utiliza tiene un valor máximo de “1”, con lo cual la amplitud que debemos utilizar tiene que ser menor que este valor. El valor de frecuencia puede escribirse como “f” (en cuyo caso el programa utilizará el valor de f que aparece en la parte inferior de la ventana del evaluador de expresiones), o bien puede escribirse directamente el valor numérico deseado. El punto se corresponde con el punto o la coma decimal. Para indicar una multiplicación se utiliza el asterisco “*”. De esta forma, si deseamos una oscilación senoidal con amplitud $A=0,5$ y frecuencia $f=500$, podemos escribir alguna de las dos expresiones siguientes:

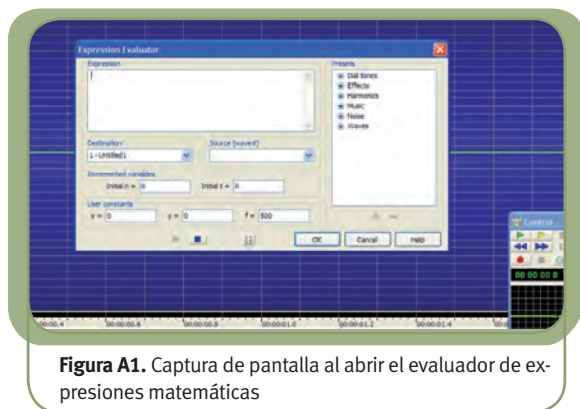


Figura A1. Captura de pantalla al abrir el evaluador de expresiones matemáticas

$$0,5*\sin(2*pi*f*t)$$

(ya que normalmente el programa comienza con $f=500$) o también:

$$0,5*\sin(2*pi*500*t)$$

³ Se trata de un programa “shareware”. Permite utilizarse sin costo como medio de evaluación del programa.

- Aparecerá una zona coloreada en la pantalla. Se trata de la oscilación senoidal pedida, pero debido a que la escala de tiempos inicial es de dos segundos y hemos elegido trabajar con 500 Hz (ciclos por segundo), el gráfico de 1.000 oscilaciones queda como una zona completamente cubierta de puntos. Para ver la oscilación con mayor detalle debemos modificar la escala temporal, cliqueando en la lupa que tiene debajo la leyenda “1:1” (escala uno en uno) y que aparece entre los íconos de la parte superior de la pantalla.
- Para escuchar esta senoidal, basta con presionar el botón de “play” que se encuentra bien a la derecha en la última fila de íconos de la parte superior de la pantalla. Se trata de un pequeño triángulo verde. Para detener la oscilación, hay que presionar el botón de “stop” (el tercer botón, junto al triángulo amarillo).

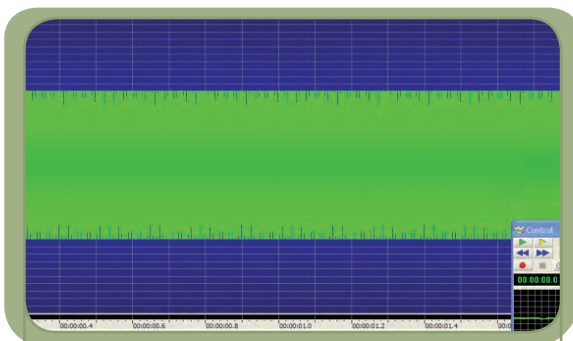


Figura A2. Captura de pantalla luego de generar una onda

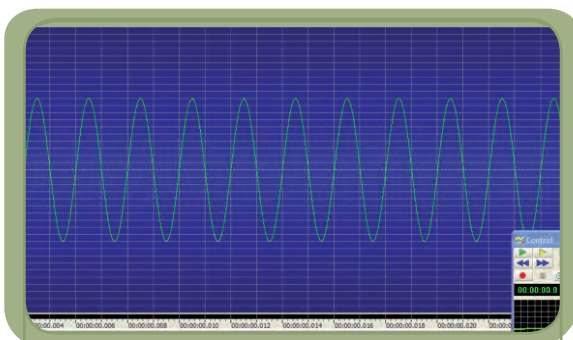


Figura A3. Captura de pantalla luego del zoom “1:1”

5.14.1.1. Tonos puros

Los tonos puros son los sonidos que poseen una única frecuencia:

- Cumplidos los pasos mínimos de utilización del software, solicitamos que exploren las diferencias que pueden detectarse al generar los siguientes sonidos:
 - a) $A = 0.1$ y $f = 500$ Hz
 - b) $A = 0.25$ y $f = 200$ Hz
 - c) $A = 0.2$ y $f = 4.000$ Hz
- Utilizando una frecuencia de $f = 4.000$ Hz, explorar valores de amplitud para determinar con la computadora y el sistema de audio que estén utilizando cuál es el valor más pequeño de A que puede aún ser escuchado. (Tener en cuenta que en la actual versión del programa existe un pequeño botón verde en la ventana de evaluación que permite escuchar antes de generar todo el dibujo de la onda, simplificando el proceso de modificar una y otra vez la amplitud o la frecuencia).
- Repetir el punto anterior para una frecuencia de 300 Hz. ¿Se nota alguna variación respecto de la experiencia anterior?

Solución: se necesitará una amplitud mucho mayor para escuchar un sonido de 300 Hz comparado con uno de 4KHz debido a la sensibilidad del oído para frecuencias medias.

- Volver a realizar el experimento con una frecuencia de 12.000 Hz.

Solución: se necesitará una amplitud mucho mayor para escuchar un sonido de 2 KHz comparado con uno de 4KHz debido a la sensibilidad del oído para frecuencias medias.

- Buscar información en Internet con relación a la “sensibilidad del oído a las distintas frecuencias” y relacionarla con las experiencias realizadas. Comparar con las curvas de sensibilidad mencionadas en el programa.

Solución: los alumnos podrán hallar las curvas de “Fletcher y Munson” o las de “Robinson y Dadson” que muestran los niveles relativos necesarios para que sonidos de diferentes frecuencias provoquen sensaciones sonoras de intensidad equivalente.

5.14.1.2. Sonidos compuestos

Es posible generar un sonido formado por la suma de más de una senoidal. Estos sonidos se denominan compuestos y al construir uno de ellos podremos comprender mejor lo que significa la expresión forma de onda y su relación con la noción de timbre.

- Colocar en el evaluador de expresiones lo siguiente:

$$0,5*\sin(2*\pi*300*t) + 0,25*\sin(2*\pi*600*t)$$

Sugerimos ver la onda generada (en escala 1:1) y escuchar el sonido provocado.

- Guardar este sonido en la computadora con el nombre “Señal compuesta” y generar otro (abrir un nuevo sonido con el ícono “New”) que tenga amplitud 0,5 y frecuencia 300. Guardarlo con el nombre “Señal pura”. Escuchar ambos sonidos y comparar sus diferencias.

Solución: la señal compuesta y la señal pura tendrán la misma frecuencia fundamental, por lo que corresponderán a una misma altura tonal, pero su timbre será diferente.

Ambos sonidos poseen igual cantidad de ciclos por segundo (como puede observarse al compararlos en escala 1:1), aunque se perciben de modo distinto. Se dice que poseen distinto timbre.

- Generar un sonido compuesto formado por cinco senoidales siguiendo la siguiente ley. La primera senoidal con amplitud de 0,5 y frecuencia de 300 Hz. La segunda senoidal, con amplitud $0,5/2$ y frecuencia $300*2$.

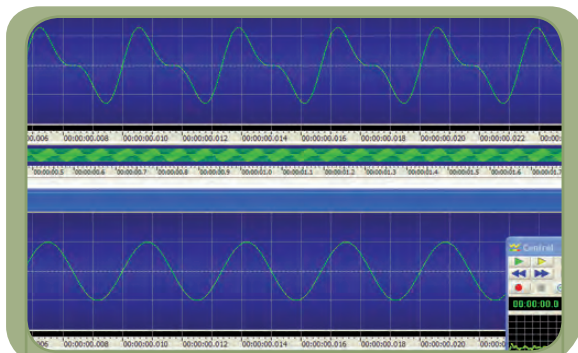


Figura A4. Comparación entre señal compuesta y señal pura

La senoidal n , con amplitud $0,5/n$ y frecuencia $300 \cdot n$. Observar la forma de onda y escuchar el resultado. Guardar el sonido con el nombre de “diente de sierra”.

NOTA: Existe una forma de anotar lo anterior de manera resumida utilizando el símbolo sumatoria (con $A_1 = 0,5$ y $f_1 = 300$):

$$\sum_{n=1}^5 \frac{A_1}{n} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f_1 \cdot t)$$

- Buscar en Internet información sobre una “onda diente de sierra” y comparar la información encontrada con los resultados obtenidos de la experiencia anterior.

Solución: la onda diente de sierra se corresponde con un gráfico que asemeja a un serrucho, se necesitarían infinitas ondas senoidales para lograr dicha forma. De todos modos es esperable que con cinco senoidales puras obtengamos una aproximación razonable a dicha forma de onda.

- Generar un sonido compuesto formado por cinco senoidales siguiendo la siguiente ley. La primera senoidal con amplitud $0,5$ y frecuencia 300 Hz. La segunda senoidal con amplitud $0,5/3$ y frecuencia $300 \cdot 3$. La tercera con $A = 0,5/5$ y $f = 300 \cdot 5$. La cuarta con $A = 0,5/7$ y $f = 300 \cdot 7$. La quinta con $A = 0,5/9$ y $f = 300 \cdot 9$. Observar la forma de onda y escuchar el resultado. Guardar el sonido obtenido con el nombre de “cuadrada”.

NOTA: La secuencia se corresponde con los números impares, de modo que si n indica el número asignado a cada senoidal en la descripción verbal anterior, entonces podemos decir que $(2n-1)$ será el número por el que hay que dividir a la amplitud y multiplicar a la frecuencia. Esto puede escribirse de modo resumido utilizando el símbolo de sumatoria:

$$\sum_{n=1}^5 \frac{A_1}{2n-1} \cdot \sin[2 \cdot \pi \cdot (2n-1) \cdot f_1 \cdot t]$$

- Buscar en Internet información sobre “onda cuadrada” y comparar lo hallado con la experiencia realizada.

Solución: la onda cuadrada se logra en forma teórica sumando infinitas senoidales. Con cinco senoidales estaremos consiguiendo una aproximación razonable.

- Buscar en Internet información sobre “onda triangular” y generar un ejemplo con cinco senoidales que, al sumarse, se aproximen a este tipo de onda.

Solución: una onda triangular se logra sumando armónicos impares cuya amplitud resulte inversamente proporcional al cuadrado del número de armónico y con signos alternados en orden sucesivo: el armónico 1 positivo, el 3 negativo, el 5 positivo, el 7 negativo y así siguiendo. La ecuación para sumar las cinco primeras senoidales sería la siguiente:

$$\sum_{n=1}^5 (-1)^{n+1} \cdot \frac{A_1}{(2n-1)^2} \sin[2 \cdot \pi \cdot (2n-1) \cdot f_1 \cdot t]$$

- Seleccionar en el menú de opciones de la parte superior de la ventana del Goldwave la opción “Tool” y allí elegir “Control”. Se abrirá una pequeña ventanita con una serie de

controles y dos gráficos (fondo negro y divisiones). El gráfico de la derecha representa la oscilación en función del tiempo a medida que se va escuchando, mientras que el gráfico de la izquierda, representa el espectro de Fourier del sonido que se escucha. Abrir los sonidos generados anteriormente y observar este gráfico al escuchar cada uno de ellos para intentar comprender qué información es la que se obtiene, a partir de conocer cómo fue formado cada uno de esos sonidos. Buscar en Internet “espectro de Fourier” y comparar esta información con lo que pudieron deducir de la experiencia realizada.

Solución: *se obtendrán una serie de barras correspondientes a cada armónico. Es necesario tener en cuenta al comparar los resultados del programa con los estimados que la mayoría de los sistemas informáticos que representan el espectro de Fourier utiliza una escala vertical logarítmica.*

5.14.2 Relación entre presión en pascales y nivel de presión sonora en decibeles

Las ondas sonoras provocadas en el aire son perturbaciones de presión sonora que se propagan. La presión atmosférica normal es de 1.013 hectopascales (101.300 pascales). Las perturbaciones típicas provocadas por ondas sonoras tienen valores muchísimo menores que este último valor. Una perturbación de 20 pascales, es decir una oscilación que provoque un aumento y una disminución periódica de 20 pascales en relación con nivel de 101.300 pascales se corresponde con lo que se conoce como el umbral de dolor. Una perturbación de 200 pascales ya es el umbral de daño. El mínimo audible (en laboratorio) es de 20 micropascales, esto es: 20 millonésimas de pascal. Por distintos motivos, se ha encontrado conveniente asociar el valor de la presión en pascales (unidad típica de la física) con otra magnitud que mantiene con la primera una relación logarítmica. A esta nueva magnitud se la denomina “nivel de presión sonora” y se mide en decibeles. Para cada valor de presión en pascales, hay un nivel de presión sonora en decibeles que le corresponde. La ecuación que relaciona ambas magnitudes es la siguiente:

$$N = 20 \log \left(\frac{P}{P_{\text{Pref}}} \right)$$

donde P_{Pref} es la presión de referencia de 20 micropascales, P es la presión en pascales y N es el nivel de presión sonora en decibeles.

El hecho de que se trate de una relación logarítmica saca provecho de las propiedades de los logaritmos con respecto al producto y a la división.

$$\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

5.14.2.1. Nivel de presión sonora (dB)

- Calcular el nivel de presión sonora (decibeles) que corresponde al umbral de dolor.

Solución: 120 dB.

- Calcular el nivel de presión sonora que corresponde al umbral de daño.

Solución: 140 dB.

- Calcular el nivel de presión sonora que corresponde al umbral de audibilidad (mínimo audible).

Solución: 0 dB.

- Completar la siguiente tabla:

Solución:

NOTA. Es de uso común redondear los resultados en dB quitando los decimales, así como utilizar unas pocas cifras significativas en los resultados en Pascales.

- Determinar cuánto varía el nivel de presión sonora cuando la presión aumenta al doble. Esto es, calcular la diferencia entre N_2 y N_1 , si sabemos que la presión sonora P_2 es el doble que P_1 .

Solución (como ejemplo):

PASCALES	DECIBELES
	140 dB
	130 dB
20 Pa	
2 Pa	
1 Pa	
	88 dB
0.4 Pa	
0.2 Pa	
20 mPa	
	46 dB
	40 dB
	34 dB
200 μPa	
20 μPa	
2 μPa	

$$\begin{aligned} N_2 - N_1 &= 20 \log \left(\frac{P_2}{P_{ref}} \right) - 20 \log \left(\frac{P_1}{P_{ref}} \right) \\ 20 \cdot \left(\log \left(\frac{P_2}{P_{ref}} \right) - \log \left(\frac{P_1}{P_{ref}} \right) \right) &= 20 \log \left(\frac{\frac{P_2}{P_{ref}}}{\frac{P_1}{P_{ref}}} \right) \\ 20 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) &= 20 \log \left(\frac{2P_2}{P_1} \right) \\ 20 \log (2) &= 6 \text{ dB} \end{aligned}$$

- Determinar cuánto varía el nivel de presión sonora si la presión disminuye a la mitad. Esto es, calcular $N_2 - N_1$, sabiendo que P_2 es la mitad que P_1 .

Solución: $20 \log(1/2) = -6 \text{ dB}$

- Determinar cuánto varía el nivel de presión sonora si la presión aumenta diez veces. Esto es, calcular $N_2 - N_1$, sabiendo que $P_2 = 10 \cdot P_1$

Solución: $20 \log(10) = 20 \text{ dB}$

- Determinar cuánto varía el nivel de presión sonora si la presión disminuye a la décima parte. Esto es, calcular $N_2 - N_1$, sabiendo que $P_2 = P_1/10$

Solución: $20 \log(1/10) = -20 \text{ dB}$

5.14.2.2. Relación entre nivel de presión sonora y distancia a la fuente

- La presión sonora en pascles disminuye en forma inversamente proporcional con el aumento de la distancia del punto de escucha, respecto de una fuente sonora puntual (al aire libre). Esto puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$P_2/P_1 = d_1/d_2$$

- A partir de esta expresión, determinar cuánto varía el nivel de presión sonora cuando la distancia aumenta al doble. Esto es, calcular $N_2 - N_1$ cuando se sabe que $d_2 = 2 \cdot d_1$

Solución: $20 \log(1/2) = -6 \text{ dB}$

- Determinar cuánto varía el nivel de presión sonora cuando la distancia aumenta cuatro veces. Esto es, calcular $N_2 - N_1$ cuando se sabe que $d_2 = 4 \cdot d_1$

Solución: $20 \log(1/4) = -12 \text{ dB}$

- En base a estos cálculos chequear la información brindada en el programa cuando se dan ejemplos respecto del nivel de presión sonora detectado a diferentes distancias.

ACLARACIÓN: La ley mencionada sólo es válida cuando no hay reflexiones de ningún tipo (se dice que es el comportamiento a “campo libre” o “al aire libre”). Dentro de un recinto cerrado las reflexiones contra las superficies que limitan el recinto harán que la energía sonora retorne, provocando niveles superiores a los que indicaría esta ley. De todos modos, esta ley es bastante aproximada cuando se toman en cuenta variaciones de distancia muy cercanas a la fuente y lejos de las superficies reflectantes.

5.14.3 Velocidad del sonido y retardo temporal

La velocidad de propagación de una onda indica la rapidez con que la perturbación se propaga por el medio elástico. La velocidad del sonido en aire se puede calcular mediante la siguiente expresión (considerando que la presión atmosférica es de 1.013 hectopascles y que la humedad relativa del ambiente es del 50%)⁴.

$$v = 331.9 \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 331.9 \cdot 1 + \sqrt{\frac{tC}{T_0}}$$

$$\begin{aligned} T_0 &= 273,15 \text{ K} \\ T &= T_0 + tC \end{aligned}$$

en donde T es la temperatura en grados kelvin y tC es la temperatura en grados centígrados.

⁴ Para el cálculo de la velocidad en otras condiciones consultar la siguiente dirección de internet:
<http://www.sengpielaudio.com/calculator-airpressure.htm>

Existe una ecuación más sencilla de validez muy aproximada para los casos en que la temperatura ambiente se mantiene dentro de valores normales:

$$v = 331,9 + 0,6 \cdot tC$$

La velocidad del sonido es constante (si la temperatura se mantiene constante) y se puede calcular en función de la distancia a recorrer y el tiempo requerido.

5.14.3.1. Velocidad del sonido en función de la temperatura

- Calcular la velocidad del sonido con ambas ecuaciones (exacta y aproximada para determinar el error porcentual obtenido al utilizar la formula aproximada).
El error porcentual puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\text{error (\%)} = 100 \cdot (V_{\text{aprox}} - V_{\text{exacta}}) / V_{\text{exacta}}$$

temp, v(exacta), v(aprox), error (%)

TEMPERATURA (C°)	V. EXACTA (m/s)	V. APROX (m/s)	ERROR (%)
35			
30			
25			
20			
15			
10			
5			
0			
- 5			
- 10			
0,107	352,9	352,523	35
0,071	349,9	349,652	30
0,042	346,9	346,756	25
0,019	343,9	343,836	20
0,00254	340,9	340,891	15
0,00616	337,9	337,921	10
0,00715	334,9	334,924	5
0	331,9	331,9	0
0,016	328,9	328,848	- 5
0,041	325,9	325,768	- 10
ERROR (%)	V. APROX (m/s)	V. EXACTA (m/s)	TEMPERATURA (C°)

- Determinar entre qué límites de temperatura la expresión aproximada es válida con un error del uno por ciento (1 %).

Solución: entre -62°C y 99°C

- Determinar entre qué límites de temperatura la expresión aproximada es válida con un error del 0.5 %

Solución: entre -44°C y 70°C

5.14.3.2. Tiempo de retardo provocado por la velocidad del sonido

- ¿Cuánto tarda el sonido en recorrer una cuadra (100m)?

Solución: 0.294 segundos, para una temperatura de $13,5^{\circ}\text{C}$

- Dado que la velocidad de la luz es muy elevada (unos 300.000.000 de metros por segundo), el tiempo que tarda en recorrer distancias de unos pocos kilómetros es extremadamente corto. Calcular cuánto tardamos en ver un relámpago a partir del momento en que se genera el rayo a una distancia de 1 km.

Solución: el tiempo que tarda la luz es despreciable, por lo que solamente es necesario calcular el tiempo que tarda el sonido en recorrer dicha distancia. Esto es, 2,94 segundos, para unos $13,5^{\circ}\text{C}$ de temperatura.

- ¿Cuánto tarda el sonido en recorrer un kilómetro si la temperatura es de 20°C ?

Solución: 2,91 segundos

- ¿Qué diferencia de tiempo existirá entre el momento en que observamos el relámpago y el momento en que escuchamos el trueno en una tormenta eléctrica de un rayo que se genera a 1 km de distancia ($t_{\text{C}} = 20^{\circ}\text{C}$)?

Solución: 2,91 segundos

NOTA: Para todo problema en el que no se especifique la temperatura suponer que la velocidad del sonido es de 340 m/s (esto corresponde a unos $13,5^{\circ}\text{C}$).

- ¿Qué diferencia de tiempo existirá entre el momento en que observamos el relámpago y el momento en que escuchamos el trueno en una tormenta eléctrica de un rayo que se genera a 6 km de distancia?

Solución: 17,645 segundos

- Si en medio de una tormenta eléctrica, la diferencia de tiempo que detectamos entre que percibimos un relámpago y el sonido del trueno correspondiente es de 8 segundos. ¿A qué distancia se produjo el rayo?

Solución: 2.720 m

- ¿Cuánto tarda el sonido en ir hasta una pared ubicada a 25 m de la fuente sonora y regresar al punto de partida si la temperatura es de 25°C ?

Solución: la velocidad para 25 °C es de 346.9, la distancia a recorrer es de 50 m. El tiempo es de 0,144 seg. Esto es 144 milésimas de segundo.

- Calcular el tiempo que tarda el sonido emitido por una fuente sonora en ir hasta una pared ubicada a 2 m de distancia y regresar para:

a) 0 °C

Solución: 6,026 milisegundos

b) 14 °C

Solución: 5,877 milisegundos

c) 30 °C

Solución: 5,716 milisegundos

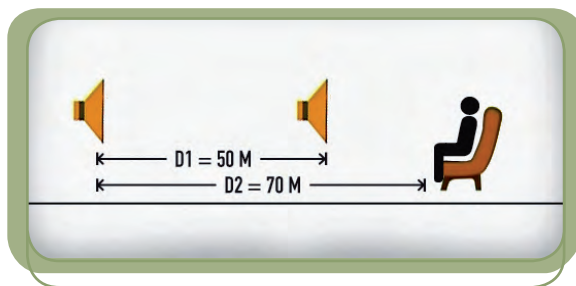
- En un gran estadio hay una distancia de 150 metros entre la ubicación de los altavoces y los espectadores que están más alejados. ¿Qué retardo temporal existe entre el momento en que se emite un sonido y el momento en que es escuchado por esos espectadores?

Solución: 0,441 segundos

- La siguiente figura muestra la ubicación de dos altavoces y el lugar en donde está el espectador. El segundo altavoz está colocado con la finalidad de reforzar la sonoridad a una gran distancia del estadio.

- a) Calcular el retardo temporal (delay) que es necesario aplicar entre los altavoces para evitar que el espectador perciba eco.

- b) ¿Cambia el resultado si se mantiene la separación entre altavoces, pero la distancia entre el primer altavoz y el espectador se lleva a 100 m, en vez de 70 m?



Solución:

a) 0,147 segundos

b) No cambia. Solamente importa la distancia que separa a los altavoces entre sí.

5.14.3.3. Reverberancia y eco

Si una fuente sonora se encuentra en un espacio cerrado, es necesario considerar que además de la señal sonora que llega directamente desde la fuente al receptor, se recibirán rebotes provocados por las reflexiones de las ondas contra las superficies que limitan el espacio cerrado. En líneas generales, si la diferencia de tiempo entre el sonido directo y la reflexión es menor a 50 ms (milisegundos) no somos capaces de distinguir perceptivamente la presencia de dos se-

ñales sonoras distintas. Se percibe un único sonido de mayor intensidad. En el caso de que las reflexiones sean múltiples, además se percibe una sensación de “ambiente amplio” conocida como reverberancia. Si la diferencia de tiempos entre el sonido directo y la reflexión es superior a los 50 ms es posible distinguir ambos sonidos y en ese caso se percibe un eco.

- ¿A qué distancia de un gran paredón deberá ubicarse una persona para ser capaz de percibir el eco?

Solución: *el sonido deberá recorrer una distancia de 17 metros totales entre ida a la pared y vuelta. Por lo tanto la pared deberá ubicarse como mínimo a 8.5 metros.*

Wallace Clement Sabine obtuvo una ecuación empírica que permite caracterizar el comportamiento de una sala, en función de la reverberación que allí se produce. Intenta tener en cuenta el tiempo que transcurre desde que una fuente sonora se apaga hasta que dejan de escucharse sus reflexiones. Como este tiempo depende del nivel de presión sonora inicial de la fuente, para poder obtener un valor independiente de la intensidad sonora inicial se define como tiempo de reverberación al que transcurre desde el momento en que una fuente sonora se apaga, hasta que el nivel de presión sonora en el ambiente disminuye 60 decibeles (este tiempo se especifica como TR_{60}).

- ¿Cuántas veces menor es la presión sonora en pascales cuando el nivel de presión sonora cae 60 dB?

Solución: *es mil veces más pequeña, ya que $20 \log (1/1.000)$ es igual a -60 dB.*

Los diferentes materiales de construcción de las superficies que limitan un recinto reflejan solamente una parte de la energía sonora que reciben. Se define como coeficiente de absorción a la proporción entre la energía que no se refleja con respecto a la energía incidente. El coeficiente de absorción se indica con la letra griega alfa (α). Un coeficiente de absorción igual a cero caracterizaría a una superficie de reflexión completa, mientras que $\alpha = 1$ designaría una superficie completamente absorbente. La absorptancia de una superficie determinada se obtiene multiplicando la superficie en metros cuadrados por el coeficiente de absorción ($S \cdot \alpha$). La ecuación empírica de Sabine requiere calcular la absorptancia total de la superficie que limita al recinto que se desea analizar. La absorptancia total del recinto se puede calcular como la suma de las absorptancias de cada una de las superficies que lo componen (piso, techo, paredes incluyendo lo que exista en estas superficies como puertas, ventanas, alfombras, cortinas, etc.).

$$\text{Absortancia (total)} = S1.\alpha1 + S2.\alpha2 + \dots + Sn.\alpha n$$

Esto se puede escribir en forma más compacta por medio del símbolo de sumatoria:

$$\text{Absortancia} = \sum_{i=1}^5 S_i . \alpha_i$$

Tanto en Internet como en distintos textos que tratan específicamente el tema de la acústica de recintos pueden hallarse tablas con coeficientes de absorción típicos de diferentes materia-

les de construcción. Las fábricas de materiales específicamente diseñados con fines acústicos proveen información sobre los coeficientes que caracterizan a sus productos. El coeficiente de absorción de los distintos tipos de materiales varía en general con la frecuencia del sonido.

La ecuación empírica de Sabine relaciona el volumen del recinto y su absorción total con el tiempo de reverberación:

$$TR_{60} = 0,161 \cdot \text{Vol} / \text{Absortancia}$$

Ejemplo de cálculo:

Se dispone de un recinto rectangular de 5 m de largo, 4 m de ancho y 3 m de altura. Todas sus superficies son de hormigón, con un coeficiente de absorción $\alpha = 0,08$ (para una frecuencia de 1 KHz). Calcular el TR_{60} de este recinto.

El volumen se obtiene multiplicando el largo el ancho y la altura:

$$\text{Vol} = 5 \times 4 \times 3 = 60 \text{ m}^3 \text{ (metros cúbicos)}$$

La absorción se obtiene multiplicando el valor de cada superficie en metros cuadrados por su coeficiente de absorción:

$$\text{Absortancia} = 5 \times 4 \times 0,08 + 5 \times 4 \times 0,08 + 5 \times 3 \times 0,08 + 5 \times 3 \times 0,08 + 4 \times 3 \times 0,08 + 4 \times 3 \times 0,08$$

$$\text{Absortancia} = 7,52 \text{ m}^2 \text{ (o "sabines métricos")}$$

Con estos valores es posible calcular el TR_{60} .

$$TR_{60} = 0,161 \cdot 60 / 7,52 = 1,285 \text{ segundos}$$

- Recalcular el TR_{60} en el caso de que el techo se cubra con un material cuyo coeficiente de absorción sea $\alpha = 0,4$.

Solución: en este caso la absorción será de 37,6 sabines métricos. Por lo que el TR_{60} será igual a 0,257 segundos.

5.16. Referencias

5.16.1 Bibliografía

Miyara, Federico (1999) *Acústica y Sistemas de Sonido*. Universidad Nacional de Rosario.

Basso, Gustavo (1999) *Análisis espectral. La Transformada de Fourier en la Música*, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.

Serway, Raymond; Jewett, John (2004): *Física para Ciencias e Ingenierías. Volumen 1. Sexta Edición*, Editorial Thomson.

5.16.2 Webgrafía

Recursos disponibles en la página de la Universidad Nacional de Rosario

<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/biblio/biblio.htm>

<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/faquesp.htm>

Tabla con coeficientes de absorción típicos de diferentes materiales

<http://www.elruido.com/divulgacion/curso/condicionamiento/TABLA41.htm>

Cálculo de la velocidad del sonido en diferentes condiciones ambientales

<http://www.sengpielaudio.com/calculator-airpressure.htm>