

APUNTES DE ACUSTICA.

Denominamos Acústica a la rama de la Física que estudia la producción, transmisión, almacenamiento, percepción y reproducción del sonido. El sonido consiste en una variación en la presión de un medio elástico, como el aire o el agua, que se propaga a través de la materia, bien sea en estado gaseoso, líquido o sólido, en pequeñas fluctuaciones rápidas llamadas ondas sonoras. El sonido no se propaga en el vacío. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio en el que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera. El sonido en el aire se genera al crearse una variación o perturbación que establece una serie de ondas de presión (ondas sonoras) que fluctúan por encima y por debajo de la presión del aire en el equilibrio (la atmosférica) y que, en general, se propagan en todas las direcciones desde la fuente sonora. Nuestro oído es sensible a estas fluctuaciones de presión y las convierte en impulsos eléctricos que se transmiten al cerebro para su interpretación. Al analizar el sonido existen tres elementos a considerar: la fuente emisora, que puede ser bien deseable o bien indeseable; el medio a través del que se produce la transmisión del sonido y finalmente el receptor. Cuando se desea escuchar el sonido (p.ej. palabra o música) es necesario optimizar las condiciones de producción, transmisión y recepción, mientras que si lo que se desea es no recibir el sonido habrá que hacer justo lo contrario.

Las fuentes sonoras que afectan a los edificios y a las personas son muchas y muy variadas, yendo desde la voz humana, las actividades humanas, sonidos exteriores como los debidos al tráfico o a aviones, etc. . . hasta los debidos a maquinaria e instalaciones dentro de los mismos edificios. Al igual que en el aire, el sonido puede viajar por materiales sólidos y líquidos. Dependiendo del medio por el cual el sonido viaja en un momento dado hablamos de sonido aéreo y sonido estructural. El sonido puede originarse en el aire, viajar por el aire, ser captado por una estructura, propagarse por la misma y ser finalmente reemitido de nuevo al aire.

El sonido que nos llega es, en general, superposición de ondas sonoras de distintas frecuencias. Denominamos banda de audiofrecuencias a la gama de frecuencias audibles. El oído humano puede escuchar† frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz, aunque es más sensible en el intervalo entre 1 y 5 kHz. Por otra parte en música sólo se emplean sonidos

en el rango entre 30 Hz y 12 kHz. El caso más sencillo de sonido corresponde a un tono puro, en el que la onda de sonido que se propaga puede representarse por una función armónica, que contiene una única frecuencia. Cualquier sonido periódico puede representarse por una superposición discreta de tonos puros, de acuerdo con el teorema de Fourier, cada uno de ellos con su correspondiente intensidad. Asimismo, cualquier función describiendo un sonido complejo puede representarse mediante una integral de Fourier en la que puede aparecer un continuo de frecuencias en vez de la serie de frecuencias discretas que teníamos para una función periódica. Denominamos ultrasonidos a los sonidos cuya frecuencia es mayor que el límite superior de audición (20 kHz) e infrasonidos a aquéllos de frecuencia menor que el límite inferior de audición (20 Hz). El estudio de los ultrasonidos constituye una rama especial de la Acústica. Éstos tienen aplicaciones en campos muy distintos, que van desde la metalurgia (para el ensayo no destructivo de materiales) hasta la Medicina (en diagnósticos y en tratamientos), pasando por sistemas de limpieza, alarmas, etc. Por otra parte, los infrasonidos, aunque tienen algunas aplicaciones industriales (sismología, ensayo del comportamiento de estructuras), son especialmente importantes por sus efectos biológicos perniciosos. En pequeñas intensidades actúan, a través de los conductos acústicos sobre los órganos de equilibrio del cerebro, pudiendo producir vértigos, mareos y náuseas. En grandes intensidades pueden producir hemorragias internas como consecuencia de fricciones entre órganos del oído. En general pueden producir incluso fatiga nerviosa, alergias y anomalías digestivas, visuales y auditivas. La frecuencia más perjudicial es 7 Hz, que coincide con la frecuencia de las ondas alpha de los electroencefalogramas (que son las ondas de reposo del cerebro), por lo que todo trabajo intelectual se hace imposible en presencia de infrasonidos de esa frecuencia. Cualquier sonido sencillo, como es el caso de una nota musical, puede describirse mediante tres parámetros: la intensidad, el tono y el timbre, que corresponden a tres características físicas: la amplitud, la frecuencia y la composición espectral (o en frecuencias), dada por la forma de la onda. La intensidad, como veremos más adelante, está asociada a la cantidad de energía que lleva la onda por unidad de tiempo y de superficie en la dirección de propagación. El tono está asociado con la frecuencia de la componente principal del sonido (o armónico fundamental) y el timbre con las intensidades relativas de otras frecuencias además de la frecuencia fundamental. Se denomina ruido a un sonido que contiene una combinación aleatoria de frecuencias, aunque con frecuencia se utiliza la palabra ruido para todo sonido que

distrae, incomoda o daña al receptor humano y perturba sus actividades cotidianas (trabajo, descanso, entretenimiento, estudio, salud, etc.) en un momento dado.

Salvo los tonos puros o los sonidos compuestos de un pequeño número de tonos puros, la mayoría de los sonidos están compuestos de una amplia variedad de frecuencias. Esto es cierto para la palabra y la música, pero especialmente para el ruido, lo que hace necesario tener en cuenta cada una de las frecuencias en el análisis acústico, con las complicaciones que esto lleva aparejado. Por simplicidad, en vez de analizar cada componente en frecuencias por separado se analiza el problema en una serie de intervalos de frecuencias que cubren todo el espectro de interés, cada uno de ellos caracterizado por una cierta frecuencia, a la que se asigna toda la energía acústica correspondiente a dicho intervalo. A cada uno de esos intervalos se le denomina banda de octava y cumplen que su frecuencia superior es el doble de su frecuencia inferior.

Cuando se toma 1000 Hz como patrón de frecuencias, el criterio para construir las bandas de octava es $v_{central}(n) = 1000 \cdot 2^n$, con $-6 \leq n \leq 4$. El criterio anterior se denomina criterio acústico ya que es el que se comúnmente se utiliza en Acústica, pero a veces aparecen otros criterios, dependiendo del campo de aplicación. Por ejemplo, según el criterio matemático, las frecuencias centrales vendrían dadas por 2^n , con $4 \leq n \leq 14$ y serían 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 y 16384. El criterio fisiológico toma como referencia inferior la frecuencia de 20 Hz, y las bandas centrales vendrían dadas por 20×2^n , con $0 \leq n \leq 10$, siendo éstas 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120, 10240 y 20480. Nótese que, independientemente del criterio, el margen entre las frecuencias audibles límite más grave y más agudo contiene 10 bandas de octava, es decir, la extensión de la banda de audiofrecuencias es de 10 bandas de octava. Las bandas de octava que acabamos de definir cubren algo más que el espectro de audiofrecuencias. Para medidas de mayor precisión, cada banda de octava se divide en tres bandas de tercios de octava.

La referencia patrón de intensidad para sonidos aéreos es de 10^{-12} W/m² que equivale a la intensidad de un tono puro de 1 kHz en el límite de audibilidad de una persona de audición normal. La presión de pico correspondiente es $p_{max} = 2,89 \times 10^{-5}$ Pa y la presión eficaz $p_{ef} = 20,4 \mu\text{Pa}$. Esta presión, simplificada a 20 μPa suele utilizarse como referencia para los niveles de presión sonora en el aire. El nivel de dolor se encuentra aproximadamente en 1 W/m², que corresponde a una presión máxima de unos 28 Pa y a

una eficaz de 20 Pa. Esta intensidad umbral depende de la frecuencia, y por tanto también la presión umbral. Por ejemplo, a 40 Hz, la intensidad umbral es de 6×10^{-7} W/m², a 100 Hz es de 7×10^{-9} W/m² y a 10000 Hz de 8×10^{-12} W/m². Salvo que se especifique otra cosa, se tomará 10^{-12} W/m² como referencia de intensidad umbral para todas las frecuencias. Al igual que ocurría en las frecuencias (con un rango entre 20 Hz y 20 kHz), la gama de presiones (entre 20 µPa y 100 Pa) e intensidades (entre 10^{-12} y 1 W/m²) dentro del campo de audición es tan grande que es aconsejable el uso de escalas logarítmicas que comprimen el rango de órdenes de magnitud necesarios para describir este gran intervalo de intensidades, frecuencias o presiones. Es más, cuando la intensidad del sonido crece en progresión geométrica el aumento de la sensación sonora que el oído percibe se asemeja más a una progresión lineal (según la denominada ley de Weber-Fechner). Esto es característico de un comportamiento logarítmico. Por las razones que acabamos mencionar, en Acústica las magnitudes se miden en niveles, siempre referidas a un valor de referencia que constituye el cero de la escala de medida.

Cuando se tienen distintas fuentes acústicas, el nivel resultante no será la suma de niveles, debido al carácter logarítmico de la definición de nivel acústico, y en el caso más general ni siquiera el cuadrado de la amplitud de la onda de presión será la suma de los cuadrados de las amplitudes de cada una de ellas, sino que la superposición de las ondas.

El efecto que el ruido de fondo tiene sobre el nivel acústico real que se quiere medir depende de la diferencia entre el nivel acústico total y el del ruido de fondo. Antes de intentar aislar el nivel acústico debido a la fuente deseada es conveniente conocer el nivel de ruido de fondo.

Cuando la diferencia entre el nivel acústico total y el del ruido de fondo es mayor de 10 dB, el ruido de fondo puede ser despreciado.

Si la diferencia entre el nivel acústico total y el del ruido de fondo es inferior a 3 dB, el ruido de la fuente es inferior al ruido de fondo y el valor que se obtiene no es en absoluto preciso, sino como mucho aproximado, los errores en las medidas afectan mucho al resultado.

El grado de molestia producido por un sonido no deseado, dependerá no solamente de la intensidad del mismo, sino también de su composición en frecuencias, continuidad,

momento de emisión, contenido de información, origen del ruido e incluso en ocasiones de aspectos subjetivos como el estado mental y temperamental del receptor.

Los sonidos de origen natural suelen resultar más aceptables, mientras que el ruido más molesto suele ser el producido por elementos mecánicos. El nivel de molestia producido por ruidos en los que predominan las frecuencias altas es mayor que el nivel producido por los ruidos en los que predominan las frecuencias bajas.

Ruido continuo o constante: El ruido continuo o constante es aquel ruido cuya intensidad permanece constante o presenta pequeñas fluctuaciones (menores ± 5 dB) lo largo del tiempo. Por ejemplo, el producido por máquinas o motores que trabajan de forma continúa.

Ruido fluctuante: El ruido fluctuante es aquel ruido cuya intensidad fluctúa lo largo del tiempo en intervalos mayores que ± 5 dB. Las fluctuaciones pueden ser periódicas o aleatorias. Un ejemplo de ruido fluctuante sería el ruido del tráfico.

Ruido transitorio: El ruido transitorio tiene comienzo y final en un corto intervalo de tiempo, como ocurre con el paso de un vehículo.

Ruido de impacto: El ruido de impacto es aquel ruido cuya intensidad aumenta bruscamente durante un impulso. La duración de este impulso es breve, en comparación con el tiempo que transcurre entre un impulso.

Ruido blanco: El ruido blanco consiste en una señal de banda ancha que contiene todas las frecuencias del espectro con distribución aleatoria de amplitud que da una densidad espectral independiente de la frecuencia. En la práctica, su rango a efectos de medidas experimentales va de los 20 Hz a los 20 kHz.

Si se representa la densidad de energía en función de bandas de octava en vez de linealmente frente a la frecuencia, se obtiene una recta ascendente de pendiente 3 dB/octava ya que en cada banda hay el doble de frecuencias que en la anterior. El nombre proviene de la luz blanca, que es una mezcla de todas las frecuencias.

El sonido producido por el agua corriente se ajusta bastante bien al ruido blanco. La imagen de un televisor analógico cuando no está sintonizado ningún canal también es

ruido esencialmente blanco. El ruido blanco de baja intensidad puede favorecer la relajación y el sueño. El ruido blanco se utiliza para la calibración de la respuesta en frecuencia de equipamientos electrónicos que trabajan con sonido.

Ruido rosa: El nombre “ruido rosa” obedece una analogía con la luz blanca (que es una mezcla de todos los colores) que, después de ser coloreada de forma que se atenúen las frecuencias más altas (los azules y violetas) resulta en un predominio de las frecuencias bajas (los rojos). Así pues, el ruido rosa es ruido blanco coloreado de manera que es más pobre en frecuencias altas, esto es: en agudos. Mientras que el ruido blanco es más “silbante”, el ruido rosa es más “apagado”.

El espectro del ruido rosa es semejante al espectro medio acumulado de la música sinfónica o de instrumentos armónicos como el piano o el órgano. Asimismo se parece al ruido de funcionamiento de un dispositivo electrónico (el “flicker noise”), parecido también al que se percibe entre dos emisoras de FM, suena como un soplido.

Se utiliza para calibrar equipos que van reproducir sonido y así analizar el comportamiento de salas, altavoces, equipos de sonido etc. Al ser una señal patrón conocida, al generarla través de un altavoz es posible conocer datos sobre el comportamiento acústico del altavoz, la sala etc. y equalizar salas, haciendo que todas las bandas se vean al mismo nivel en un micrófono de respuesta plana.

Decimos que una fuente es omnidireccional si emite por igual en todas las direcciones. Para una fuente omnidireccional la propagación se realiza uniformemente en forma de ondas esféricas con la fuente como foco.

En realidad todas las fuentes sonoras emiten con más intensidad en unas direcciones que en otras y por tanto son fuentes direccionales. Para describir su comportamiento e define el coeficiente de directividad: relación entre la intensidad acústica que se mide en un punto en una determinada dirección y la que habría si la fuente fuese omnidireccional y tuviese la misma potencia sonora.

Las características físicas de las ondas pueden expresarse mediante parámetros físicos como intensidad y frecuencia, que pueden medirse con una cierta precisión de forma objetiva mediante los instrumentos apropiados. Sin embargo, la respuesta del oído tiene

un carácter más subjetivo, que habrá que relacionar con los parámetros físicos objetivos. Éste es precisamente el objeto de la Psicoacústica, rama de la Psicofísica que estudia la relación existente entre las características físicas de un estímulo sonoro, y la respuesta de carácter psicológico que el mismo provoca en una persona. La Psicoacústica es una disciplina esencialmente empírica. Sus conclusiones se obtienen a partir del análisis estadístico de los resultados de experimentos que buscan medir la respuesta subjetiva de distintas personas a estímulos de propiedades físicas cuantificadas.

Algunos de los objetivos principales de la psicoacústica son:

- Establecer un modelo de la relación existente entre la magnitud de la sensación producida por un estímulo y la magnitud física del mismo.
- Establecer los umbrales (absolutos) de sensación en cada parámetro, como frecuencia e intensidad.
- Establecer los umbrales diferenciales de percepción en cada parámetro del estímulo (mínima variación y mínima diferencia perceptibles).
- Estudiar la sensación sonora producida en respuesta a varios estímulos simultáneos.

Los experimentos que dan lugar a dichas predicciones, con las reservas que conlleva el hecho de la variabilidad de estímulos, escuchas, situaciones de entorno e incluso cualquier tipo de predisposición mental, permiten establecer relaciones de sensación sonora con intensidad y frecuencia.