

# **Acústica Medioambiental**

## **Vol. I**

Dr. Robert Barti Domingo

**Acústica Medioambiental vol I**

© Dr. Robert Barti Domingo

ISBN: 978-84-9948-020-6

Depósito legal: A-921-2010

Edita: Editorial Club Universitario. Telf.: 96 567 61 33

C/. Cottolengo, 25 – San Vicente (Alicante)

[www.ecu.fm](http://www.ecu.fm)

Printed in Spain

Imprime: Imprenta Gamma. Telf.: 965 67 19 87

C/. Cottolengo, 25 – San Vicente (Alicante)

[www.gamma.fm](http://www.gamma.fm)

[gamma@gamma.fm](mailto:gamma@gamma.fm)

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información o sistema de reproducción, sin permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

## **ÍNDICE**

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 1  |
| Capítulo 1  |    |
| PROPIEDADES DEL SONIDO .....                                      | 9  |
| 1.1. El Sonido .....  | 9  |
| 1.2. Atributos básicos del sonido.....                            | 11 |
| 1.3. Medida del nivel sonoro. El decibelio.....                   | 13 |
| 1.4. La intensidad sonora.....                                    | 15 |
| 1.5. La potencia sonora .....                                     | 16 |
| 1.6. Operaciones con decibelios .....                             | 17 |
| 1.7. Promediado de decibelios.....                                | 17 |
| Capítulo 2  |    |
| PROPAGACIÓN DEL SONIDO .....                                      | 21 |
| 2.1. Ondas transversales y longitudinales .....                   | 21 |
| 2.2. Tipo de fuentes acústicas.....                               | 22 |
| 2.3. Patrón de radiación de las fuentes acústicas.....            | 26 |
| 2.4. Fuentes coherentes. Fuentes incoherentes.....                | 32 |
| 2.5. Agrupación de fuentes.....                                   | 35 |
| 2.6. Factores ambientales .....                                   | 38 |
| 2.7. Propagación del sonido en situación real .....               | 52 |
| 2.8. Distancia de medida .....                                    | 54 |
| Capítulo 3  |    |
| MEDIDA DEL SONIDO .....   | 57 |
| 3.1. Factores a considerar en la medida del ruido ambiental ..... | 57 |
| 3.2. Características temporales de una señal .....                | 58 |
| 3.3. Tipos de ruido en función de su evolución temporal .....     | 59 |
| 3.4. Tipos de Señales .....                                       | 62 |
| 3.5. Integración temporal de la señal sonora.....                 | 65 |
| 3.6. El nivel continuo equivalente. Leq.....                      | 67 |
| 3.7. Sound Exposure Level. SEL .....                              | 69 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.8. Composite Noise Rating. CNR .....                                | 72  |
| 3.9. Community Noise Equivalent Level. CNEL.....                      | 73  |
| 3.10. Day - Night Level. $L_{dn}$ .....                               | 74  |
| 3.11. Day – Evening – Night Level. $L_{den}$ .....                    | 74  |
| 3.12. Análisis estadístico. Nivel Percentil $L_{10}$ y $L_{90}$ ..... | 76  |
| 3.13. Distribución estadística de la señal .....                      | 79  |
| 3.14. Traffic Noise Index. TNI .....                                  | 81  |
| 3.15. Noise Pollution Level. NPL .....                                | 81  |
| 3.16. Redes de ponderación.....                                       | 82  |
| 3.17. Origen de la ponderación A.....                                 | 85  |
| 3.18. Micrófonos .....  | 87  |
| 3.19. Micrófono de estado sólido .....                                | 93  |
| 3.20. El sonómetro .....  | 99  |
| 3.21. Filtrado de la señal .....                                      | 126 |

## Capítulo 4

|   |     |
|---|-----|
| SISTEMA AUDITIVO HUMANO.....                                  | 137 |
| 4.1. Introducción .....                                       | 137 |
| 4.2. Anatomía del oído .....                                  | 138 |
| 4.3. Teoría de la audición .....                              | 152 |
| 4.4. Percepción tonal .....                                   | 154 |
| 4.5. Discriminación temporal .....                            | 156 |
| 4.6. Fenómeno de enmascaramiento .....                        | 156 |
| 4.7. Las audiometrías .....                                   | 157 |
| 4.8. El test audiométrico.....                                | 158 |
| 4.9. Particularidades del oído .....                          | 156 |
| 4.10. Adaptación y habituación del oído al nivel sonoro ..... | 157 |
| 4.11. Seguimiento y reconocimiento de conversaciones.....     | 168 |
| 4.12. Percepción binaural .....                               | 168 |

## Capítulo 5

|  |     |
|--|-----|
| EFECTOS DEL RUIDO SOBRE LAS PERSONAS .....       | 175 |
| 5.1. Efectos del ruido sobre las personas .....  | 175 |
| 5.2. Grado de interferencia con la palabra ..... | 176 |
| 5.3. Efectos auditivos.....                      | 177 |
| 5.4. Criterios de Pérdida de audición .....      | 185 |
| 5.5. ¿Tienen solución los PTS? .....             | 187 |
| 5.6. Efectos no auditivos del ruido .....        | 188 |
| 5.7. Sonidos con finalidades terapéuticas.....   | 193 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.8. Normativa Española. RD 286/2006 .....                     | 196 |
| <b>Capítulo 6</b>  |     |
| LA SONORIDAD DEL SONIDO .....                                  | 201 |
| 6.1. Sonoridad de una señal acústica.....                      | 201 |
| 6.2. Valoración de la Sonoridad.....                           | 202 |
| 6.3. Estándar ISO 226:2003 .....                               | 206 |
| 6.4. Cálculo de la sonoridad .....                             | 207 |
| 6.6. Evaluación del Grado de Molestia .....                    | 213 |
| 6.7. Nivel efectivo de percepción de molestia. $L_{EPN}$ ..... | 215 |
| 6.8. Sonoridad de señales impulsivas.....                      | 217 |
| <b>Capítulo 7</b>  |     |
| ANÁLISIS EN FRECUENCIA .....                                   | 219 |
| 7.1. Análisis Espectral .....                                  | 219 |
| 7.2. La transformada de Fourier .....                          | 220 |
| 7.3. Análisis digital de la señal .....                        | 221 |
| 7.4. La Transformada de Fourier Discreta DFT .....             | 222 |
| 7.5. La Fast Fourier Transform (FFT) .....                     | 223 |
| 7.6. Técnicas Wavelet.....                                     | 229 |
| <b>Capítulo 8</b>  |     |
| RUIDO DE TRÁFICO.....  | 231 |
| 8.1. Ruido de tráfico .....                                    | 231 |
| 8.2. Ruido de vehículos .....                                  | 232 |
| 8.3. Fuentes de Ruido en Vehículos .....                       | 233 |
| 8.4. Comparación entre ruido de motor y de rodadura.....       | 235 |
| 8.5. Características del ruido de automoción .....             | 235 |
| 8.6. Ruido del propulsor .....                                 | 237 |
| 8.7. Ruido de admisión.....                                    | 241 |
| 8.8. Ruido de escape.....                                      | 241 |
| 8.9. Ruido de frenos .....                                     | 244 |
| 8.10. Ruido aerodinámico .....                                 | 245 |
| 8.11. Ruido de rodadura .....                                  | 246 |
| 8.12. El futuro del neumático actual .....                     | 270 |
| 8.13. Estado del arte sobre el ruido de rodadura .....         | 271 |
| 8.14. Vehículos eléctricos.....                                | 275 |
| 8.15. Ruido generado por camiones .....                        | 275 |
| 8.16. Autobuses .....  | 276 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.17. Ruido de motocicletas .....                              | 280 |
| 8.18. Influencia del modo de operación de los vehículos.....   | 284 |
| 8.19. Efectos de la reducción del ruido en otros aspectos..... | 285 |

## **INTRODUCCIÓN.**

Desde hace muchos años los hombres viven rodeados de sonidos y ruidos. Los ruidos que nos rodean han servido desde tiempos ancestrales, para alertar de los peligros. Nótese que el oído es el único sentido que no se puede desconectar voluntariamente. Las funciones primarias del oído son alertar de los peligros y de la presencia de otros seres u animales, y la comunicación con nuestros semejantes. Podemos considerar sonidos aquellos que son agradables al oído y/o que aportan información útil, mientras que los ruidos son aquellos que no aportan en principio, información. Cuando un sonido molesta se considera ruido, para indicar que no solamente molesta, sino que además no es deseado. Desde un primer momento hay que tener en cuenta la gran subjetividad cuando se evalúa cualquier sonido. Un mismo sonido puede tener diferentes interpretaciones para cada persona; el rock agrada a un determinado público, mientras que el foxtrot agradaría a otro bien distinto. Incluso nuestra canción preferida escuchada al mediodía, no se valora de la misma manera cuando se escucha de madrugada durante el descanso nocturno. Al mediodía no molesta, bien al contrario seguramente la tentación es subir el volumen, y en cambio de madrugada molesta mucho. En este ejemplo, aunque el nivel sonoro sea apreciablemente menor de madrugada, nos molesta mucho más. La molestia que un sonido genera no siempre va ligada a un mayor nivel sonoro.

En los vuelos aéreos siempre algunas personas se duermen. El nivel de ruido dentro de la aeronave se sitúa sobre los 85 dB(A). Las personas están vestidas y sentadas en sillas incómodas, y a pesar de todo se duermen. Esas mismas personas es probable que en su cama en una posición mucho más cómoda y con un ruido de fondo de solo 35 dB(A) no puedan dormir. ¿Es eso normal? ¿Por qué ocurre? El no poder dormir no tiene porqué ser una cuestión únicamente de nivel de ruido, los nervios, la excitación, y otros factores pueden incidir en la falta de sueño.

Notemos que existen ruidos naturales, como los truenos, la caída de la lluvia, las olas de mar, y los sonidos de origen humano generalmente asociado a máquinas. Ambos tienen unos aspectos diferenciales: los naturales no son considerados molestos, a excepción del estruendo de los truenos que por los elevados niveles sonoros y sobre todo por su brusquedad resultan altamente

molestan. Por otro lado los ruidos “artificiales” son generalmente molestos. El ruido de la lluvia puede llegar a ser superior al generado por la lavadora del vecino, y en cambio éste último nos molesta mucho más. La contaminación acústica es, en todos los casos, el resultado de la actividad humana.

El ruido afecta por igual a todas las personas independientemente de su lengua, estudios o nivel económico. No distingue clases sociales, culturales o étnicas. Hay ruido, molesto o infernal, en la calle. Hay ruido en los restaurantes, bares, cafés, donde hay que gritar para poder superar las voces de los vecinos. El ruido es un contaminante asociado inevitablemente al proceso de industrialización y que está asumido por la sociedad como una cuestión “de facto”. El ruido de las industrias, es un hecho considerado “normal”, incluso resulta necesario en algunos casos. En las ciudades, en los hogares, el ruido es un elemento más con el que se debe aprender a convivir obligatoriamente.

Los efectos negativos que el ruido produce sobre la salud están bastante documentados. Los efectos fisiológicos son los más fáciles de detectar, la pérdida de audición, o los efectos sobre el aparato respiratorio, sistema vascular o gástrico son algunos de los más conocidos. Pero los más devastadores y con diferencia, son los efectos psicológicos, mucho más difíciles de detectar y de diagnosticar. Las secuelas psicológicas son difíciles de cuantificar, y eso las hace aparentemente menos importantes. El ruido puede llegar a ser más letal que cualquier otro contaminante, porque afecta a la conducta de las personas, su estado de ánimo, aumenta la agresividad y la intolerancia y aumenta el cansancio y la apatía. El ruido afecta a millones de personas. Algunos estudios indican la tendencia a la concentración de la población en grandes ciudades las próximas décadas. El elevado precio de la vivienda, la necesidad de ganar espacio reduciendo al mínimo el grosor de las estructuras, la proliferación de equipos de sonido con mejores prestaciones, deja entrever que presumiblemente aumentará el número de quejas por motivos de ruido. Asimismo las previsiones en materia de ruido ambiental en las ciudades del futuro no es clara. La expansión de las grandes ciudades genera la aparición de zonas de influencia urbana sobre el campo. El ruido de la gran ciudad se va expandiendo por las proximidades como una mancha de aceite. Eliminar el ruido existente es difícil y siempre es mejor prevenir “a priori” que actuar “a posteriori”. Deberá tenerse presentes ciertos aspectos urbanísticos que pueden modificar este nivel de ruido. Las costumbres de la sociedad, los hábitos adquiridos y la movilidad, son algunos de los aspectos a tener en cuenta.

La lucha contra el ruido es un tema que cada día preocupa más a la sociedad. Las asociaciones de vecinos, y otros colectivos, surgen ante la pasividad de la Administración para defender sus intereses, se informan y se documentan

sobre las leyes en materia de control de ruido. Su sorpresa es mayúscula cuando comprueban que quien padece ruido debe demostrar ante la justicia que padece ruido y que eso ocasiona molestias y muchas incomodidades, mientras que quien contamina sigue con su tarea. La Legislación no es suficientemente eficaz para solucionar los problemas de contaminación acústica. El descanso nocturno no es simplemente un derecho, es una necesidad vital para la vida humana. Por desgracia en nuestro país, el ruidoso lamentablemente siempre impone su ley, y quien se queje, ha de saber que puede ser motivo de burla, porque a los problemas de ruido se los considera, por ignorancia, un mal menor. En ocasiones es difícil poder hacer una evaluación correcta del problema. Algunas denuncias y reclamaciones relacionadas con el ruido quedan sin resolver satisfactoriamente por no enfocar el problema correctamente. Con frecuencia se tiende a unificar criterios y considerar que todos los problemas son iguales, cuando en acústica cualquier situación siempre es distinta de otras. Buena parte de culpa procede de una legislación poco eficaz y que tiende a simplificar en exceso los procesos de evaluación del ruido. Últimamente, algunas sentencias judiciales van generando jurisprudencia, cambiando poco a poco la sensación de impunidad del ruidoso.

La contaminación acústica es, hoy por hoy, la asignatura pendiente de las Administraciones, las cuales disponen, en general, de pocos recursos para afrontar las soluciones correctas. Pocos medios técnicos y sobre todo poco personal especializado es lo que echan en falta los responsables técnicos de algunos municipios. Una de las principales fuentes de ruido en las ciudades es la originada por el tráfico. Cerrar las calles al tráfico como apuntan algunos trabajos pretendidamente “avanzados” tampoco es la solución. Si se elimina el tráfico se elimina el ruido, es obvio. Es un razonamiento bastante pueril. Puede ser muy bonito en una maqueta, pero el ciudadano debe desplazarse dentro de la ciudad. Algún estudio propone crear mega-islas de casas, para disminuir el ruido en las ciudades. Si restringimos el tráfico dentro de estas islas obviamente conseguiremos reducir el nivel de ruido de las fachadas interiores, aunque los vecinos tendrán problemas de movilidad. Estrechar el espacio de circulación de vehículos tampoco es la solución a los problemas de ruido. Todas estas medidas no atacan al foco de ruido. Son medidas con efectos discutibles pero que en algún caso incrementan el riesgo de accidente. Debe actuarse sobre las fuentes que originan el ruido. La circulación de vehículos privados es inevitable, aunque un buen transporte público, rápido, cómodo y eficiente es la mejor solución para las ciudades. El problema no está dentro de las ciudades sino fuera de ellas, es decir: el cómo se accede y se sale de una ciudad. Actualmente el transporte público es mucho más lento y caro

que el transporte privado en los accesos a las ciudades. Invertir esa tendencia precisará de medidas que no sean coercitivas o coaccionantes, como facilitar el acceso a las ciudades a vehículos que vayan llenos en detrimento de otros. En ocasiones el transporte público existe pero con trayectos que no van en la dirección adecuada. Por ejemplo, para desplazarse de un domicilio situado en la zona del Maresme hacia un polígono industrial del Vallés Occidental, que dista no más de 20 Km, hay que pasar por Barcelona capital y hay que coger entre 3 y 5 medios de transporte distintos. Dependiendo del punto de partida y de llegada, el tiempo destinado al desplazamiento diario utilizando el transporte público, es en estos casos prohibitivo.

En algunas zonas urbanas donde se han cubierto las vías de circulación, los vecinos siguen quejoso con el ruido, a pesar de haber reducido éste en más de 15 dB(A). La molestia no es únicamente una cuestión de nivel sonoro sino de variabilidad de niveles. Muchas ideas que tienen por objetivo hacer una ciudad menos ruidosa, castigan en exceso al vehículo privado, cuando es el transporte público terrestre el más ruidoso. El coche es el vehículo que actualmente menos contamina acústicamente y con mucha diferencia. Pero los vehículos urbanos deben adecuar los niveles de ruido para una circulación urbana utilizando propulsores basados en sistemas silenciosos como el uso de la energía eléctrica.

Los vehículos de transporte urbano, especialmente el transporte público, deberían incorporar en sus criterios de selección el ruido emitido. El autobús urbano es un vehículo comercial convencional que hace el mismo ruido que el autobús que circula por la autopista. La comodidad del pasaje ha mejorado, pero el ruido emitido sigue siendo la asignatura pendiente. El uso de combustible alternativo, como el gas, biodiésel o hidrógeno, tampoco son elementos que por sí solos reduzcan el nivel de ruido generado. Los vehículos especiales destinados a la recogida de basura deberían ser extremadamente silenciosos, para que pudieran circular de noche causando las mínimas molestias. Los nuevos modelos cambian los colores y algunos elementos externos, pero mantienen el mismo problema: se utiliza un vehículo comercial convencional. Los niveles máximos de ruido emitido por un vehículo los fija la Unión Europea. No se trata de cambiar estos niveles sino que, en el proceso de contratación de los nuevos vehículos, se requieran unos valores más bajos de emisión sonora. En definitiva debe tenerse en cuenta el vector de contaminación acústica.

La potencia y el tipo de motor de los vehículos del futuro serán probablemente diferentes a los cánones actuales, donde el consumo energético está más controlado y en consecuencia un menor ruido emitido sea posible.

El transporte público debería dar ejemplo de contaminación acústica neutra, aquella que se mantiene dentro de los límites de ruido ambiente admisibles, muy por debajo de los actuales. El motor eléctrico tiene muchas posibilidades de ser realmente el elemento a tener en cuenta en un futuro muy cercano. Respecto de los vehículos privados, los conceptos estrella actuales, como la potencia y la velocidad, dejarán paso a otros como la funcionalidad, consumo energético y la contaminación. El coche, con el paso del tiempo, dejará de ser un mecanismo de placer para pasar a ser un elemento de movilidad restringida. No tiene mucho sentido encontrar en el mercado vehículos con potencias que los permite ir a más de 200 Km/h, cuando hay una limitación de velocidad en este sentido. Nótese que los vehículos en las últimas dos décadas han mantenido la cilindrada y el consumo, pero han aumentado espectacularmente el rendimiento, obteniendo mayor potencia. A mayor potencia mayor solicitud de la mecánica, mayor sección de neumáticos, más ruido, más elementos de seguridad, más peso y mayor consumo energético, y todo para ir, como mucho, a 120 Km/h.

Con una cilindrada menor, y con unas potencias netamente inferiores a las actuales, se podría reducir considerablemente el ruido en las ciudades, y la contaminación ambiental y el consumo energético también se reducirían drásticamente. La industria del automóvil ofrece aquellos productos que el público demanda. Mayor potencia, mejores acabados, más tecnología, más seguridad, son los valores que los compradores exigen en este momento.

La Unión Europea mantiene el mismo nivel de ruido máximo permitido en las homologaciones de vehículos desde el año 1995. Probablemente aún se tarde un cierto tiempo en reducir los niveles de emisión sonora de los vehículos, ya que el ruido de los neumáticos es excesivamente elevado y no puede reducirse con la tecnología actual.

Los vehículos automóviles, por su parte, deben pasar unas pruebas de control de ruido durante la homologación. Estas pruebas se realizan en condiciones que no tienen nada que ver con la circulación real de un vehículo. Además de no ser unas pruebas representativas de la conducción habitual, los valores medidos en la homologación son valores instantáneos máximos, mientras que las mediciones en ciudad son valores promedios. El caso más evidente de la inutilidad de la homologación de ruido, es la prueba que debe superar un vehículo pesado, donde el nivel de ruido para ser homologado, se mide con el vehículo sin carga.

Sin una reducción del nivel de ruido máximo permitido de cada vehículo individualmente, el ruido en las ciudades va a seguir manteniéndose aunque durante más horas cada día, ya que muchas calles se encuentran al borde

del colapso diariamente. Para contrarrestar esta tendencia se pueden hacer acciones sobre el asfalto o el cubrimiento de calles, pero el coste económico en este segundo caso es prohibitivo.

Si realmente se desea reducir el ruido de tráfico en las ciudades, las mediciones de homologación deben armonizarse con las mediciones en la ciudad. Se ha comprobado con unas mediciones de ruido realizadas en una céntrica calle de Barcelona los años 1985 y 1995, que el nivel de ruido en esos 10 años ha bajado una media de 1 dB(A), mientras que en el mismo período, los vehículos han reducido su nivel de ruido de manera individual en unos 6 dB(A) de promedio. El número de vehículos que pasó por delante del micrófono era prácticamente el mismo, y las características del punto de medida (anchura de la calle, número de carriles, etc.) son las mismas. No es el mayor número de vehículos lo que mantiene el nivel de ruido, nótese que la densidad de tráfico era la misma. Es el ruido de los neumáticos el responsable de la “congelación” del nivel de ruido máximo permitido para un vehículo desde el año 1995. La tecnología del neumático durante más de cinco décadas no ha tenido en cuenta el parámetro ruido en su desarrollo.

Otro foco de contaminación acústica que genera cada vez mayor número de quejas, especialmente en entornos urbanos, son las actividades musicales. Tanto el sonido interior de la actividad que puede llegar a las viviendas cercanas, como el ruido de los clientes que entran y salen del local, son motivo de queja. Estas molestias siempre están relacionadas con la dificultad para poder dormir. Los horarios en que estas actividades trabajan coincide plenamente con el horario de descanso nocturno. La proximidad de la actividad con las viviendas dificulta mucho encontrar soluciones efectivas.

En general los locales disponen de medidas correctoras. Se dice entonces que el local está “insonorizado”, entendiendo que el local está acondicionado acústicamente y que presenta un aislamiento acústico suficiente. Nótese que la supuesta “insonorización” no siempre se basa en un proyecto acústico realizado por un profesional cualificado, sino que en demasiadas ocasiones, se siguen las directrices de un profesional no cualificado, cuyo interés no es resolver el problema sino “coger la pasta”. Las grandes inversiones realizadas por algunas actividades no siempre producen los resultados esperados, el problema persiste para desesperación tanto de la actividad como de los vecinos afectados.

Es pues de vital importancia seguir un protocolo que dictamine donde está el problema, haciendo unas mediciones acústicas que realmente valoren la molestia que reciben las personas. La evolución de un suceso acústico viene determinada por numerosos parámetros. La actitud subjetiva del individuo,

el entorno físico en el que se percibe el ruido, el nivel de presión acústica percibido, su espectro en frecuencia, y su evolución temporal son algunos de los factores que determinan la forma de evaluar los sonidos. Un suceso acústico únicamente puede ser evaluado correctamente utilizando parámetros multidimensionales. Estos parámetros están basados en un conjunto de factores que interaccionan entre ellos y con la propia percepción subjetiva del individuo.

Debido a la notable dispersión de los aspectos subjetivos de la percepción acústica por parte de las personas, éstos únicamente se pueden definir en términos estadísticos. Esta complejidad motiva la necesidad de disponer de un sistema de medida que se ajuste lo más posible a la realidad, para valorar de una forma lo más eficiente posible el grado de molestia que ocasiona el ruido. A pesar de ello, las sensaciones subjetivas de la población están muy influenciadas por los aspectos culturales y fisiológicos. Así pues se ha encontrado que las preferencias acústicas sobre un ruido de automoción de los jóvenes varones japoneses se asemeja mucho al de las chicas españolas. El ruido generado por los vehículos nórdicos es distinto del generado por los vehículos del área Mediterránea. Incluso el mismo modelo lleva distinto tubo de escape en función del país al que va destinado. Y todo ello es para satisfacer unas expectativas que el cliente deposita sobre un producto. Esto dificulta y complica mucho encontrar un indicador universal del grado de molestia.

La solución ideal debería pasar por un sistema de medición binaural que permita el cálculo de parámetros indicativos de las sensaciones asociadas a los diferentes aspectos que caracterizan el sonido. El análisis y la comparación de sucesos acústicos, desde un punto de vista de confort, requieren el uso de técnicas de reproducción capaces de reproducir las sensaciones acústicas espaciales y temporales asociadas a los sucesos en estudio. Las técnicas de grabación y análisis binaural están íntimamente vinculadas a la definición de los parámetros psicoacústicos y en este contexto, el nivel sonoro, la duración del suceso acústico, el espectro en frecuencia, la estructura temporal y el número y disposición de fuentes sonoras, son aspectos que influyen notablemente en la percepción y evaluación del confort acústico asociado a un sonido.

La mayoría de fenómenos acústicos que podemos encontrar, están asociados a ruidos generados por fuentes múltiples actuando simultáneamente y distribuidas en diferentes puntos del espacio. En estos casos únicamente con un análisis y un procesado binaural de la señal se pueden obtener unos resultados cercanos a la realidad. Estos sistemas requieren la grabación del sonido con HATS (Head And Torso System), y la utilización de algoritmos

de procesado similares a los utilizados por el sistema auditivo humano. Actualmente no se dispone del conocimiento para implementar un sistema de estas características, aunque diversos investigadores de prestigio están trabajando en ello actualmente. Algunos estudios llegan a cuestionar la utilización de los HATS substituyéndolos por pares de micrófonos en la grabación de señales. El margen de frecuencia restringido que ofrecen los sistemas digitales actuales, también es motivo de discusiones. A pesar de que el margen de audio va de 20 Hz a 20 KHz, un sistema que se ciñe a este margen parece insuficiente para reproducir ciertos matices sonoros. El efecto “distancia” sólo se puede reproducir con sistemas que no limitan a los 20 KHz.

Los indicadores utilizados actualmente para evaluar el nivel de sonido no se ajustan a la percepción auditiva humana. Cuando los niveles de ruido son elevados, lo más importante es el nivel de presión acústica, ya que un nivel elevado puede resultar peligroso. Pero en los casos donde los niveles de ruido son bajos, realmente las medidas “clásicas” utilizando el Leq y el dB(A) se apartan mucho de la realidad. Por ejemplo evaluando el nivel de ruido en ambiente interior producido por una actividad musical cercana, generalmente implica unos niveles de presión acústica bastante bajos. El oído es capaz de detectar la información de la música por debajo del nivel del ruido de fondo. Con una medición del Leq (dB(A)) se llega a la conclusión equivocada de que no existe ninguna contaminación acústica, cuando de hecho, la persona afectada no puede dormir. Algunos expertos en acústica a nivel mundial como Per Brüel, o Karl Kryter, cuestionan seriamente el uso abusivo del dB(A). La legislación en general no incorpora las novedades y avances técnicos, que hace unas décadas que existen y sigue utilizando los indicadores creados en los años 60 con los conocimientos y tecnología de los años 30.

El silencio es un signo de respeto, cultura y educación hacia nuestro entorno, si deseamos un entorno más saludable y menos contaminado, debemos conocer como se origina el ruido para poder atacarlo allí donde se produce.

## **Capítulo 1**

### **PROPIEDADES DEL SONIDO**

#### **1.1. El Sonido.**

El sonido nos permite comunicarnos con otras personas. Es el único sentido que no se puede desconectar voluntariamente, siempre trabaja. Es el sentido que nos alerta de los peligros. El oído realiza algunas funciones muy potentes que no son muy conocidas pero necesarias para el buen desarrollo de nuestras funciones. Gracias al oído podemos centrarnos en una tarea sin dejar de “percibir” lo que hay a nuestro alrededor. El desconocimiento de la importancia que este sentido tiene en la vida cotidiana, hace que en muchos casos se le considere un sentido de “segunda categoría”. El sentido del oído está “diseñado” para funcionar en espacios con aire a su alrededor. La ausencia de aire imposibilita la propagación del sonido, y por tanto no es posible percibir ningún sonido. La gran pantalla muestra en ocasiones explosiones en el espacio con gran estruendo, deformando la realidad y creando confusión al respecto. La capacidad auditiva es limitada tanto en nivel como en frecuencia. La percepción del sonido es muy subjetiva e influenciable por las condiciones de contorno. Algunas son fácilmente medibles, como las condiciones acústicas, presencia de obstáculos u objetos, tipo de superficies, etc. Otras no son tan fáciles de medir, como el estado de ánimo cuando se produce el sonido.

Usualmente se mide el sonido para evaluar su capacidad contaminante. Sin embargo la mayoría de mediciones no tienen en cuenta los aspectos subjetivos del sonido. Las mediciones sonométricas empleadas actualmente por las legislaciones vigentes son muy simplistas y carentes de realismo, por lo que en muchas ocasiones su valoración no refleja la situación real. Es necesario hacer mediciones del sonido que aporten toda la información del problema, y de esta manera poder emitir un juicio más fundamentado.

El oído presenta un margen dinámico excepcional, que supera al de cualquier equipo electrónico. Pero también tiene muchas limitaciones, como la memoria acústica, que es muy limitada. Esto hace que no se pueda comparar el nivel de dos sonidos con unas horas de diferencia, es decir, no podemos recordar con exactitud el nivel de un sonido. Podemos reconocer

la voz de una persona que hace unas semanas, meses o incluso años que no escuchamos con una precisión que ninguna máquina consigue, y en cambio no podemos recordar si un sonido era más o menos fuerte, siempre que las diferencias no sean muy elevadas, claro. Parece que nuestro sentido auditivo es capaz de realizar potentes funciones, y en cambio falla en aquellas cosas aparentemente más simples.

El aire es el medio más habitual de propagación del sonido. Éste también se puede propagar por otros medios como líquidos o sólidos. El oído está sometido a una presión atmosférica estática. Esta presión incide sobre la membrana timpánica del oído, aunque realmente no es que ésta soporte toda la presión, cosa que hundiría la membrana, sino que las dos caras de la membrana timpánica se encuentran a la misma presión estática, gracias a la trompa de Eustaquio, un conducto que se abre esporádicamente en los procesos de deglución o bostezo y que permite igualar las presiones a ambos lados de la membrana timpánica entre el oído externo y el oído medio. Gracias a este mecanismo el oído se adapta a la altitud o a los cambios de presión atmosférica, para no perder sensibilidad. Cuando el oído cambia de altura de forma rápida, se pierde sensibilidad. El sonido se percibe como las minúsculas variaciones de presión que el tímpano puede detectar. La figura 1.1. muestra, de una forma gráfica, como el sonido está a caballo de la presión atmosférica.

Como se puede ver, las variaciones de la presión atmosférica son lentas y por tanto no aportan información de frecuencia ni de nivel al oído. Las variaciones audibles representan una mínima parte (5.000 millones de veces más pequeña) en comparación con la presión atmosférica.

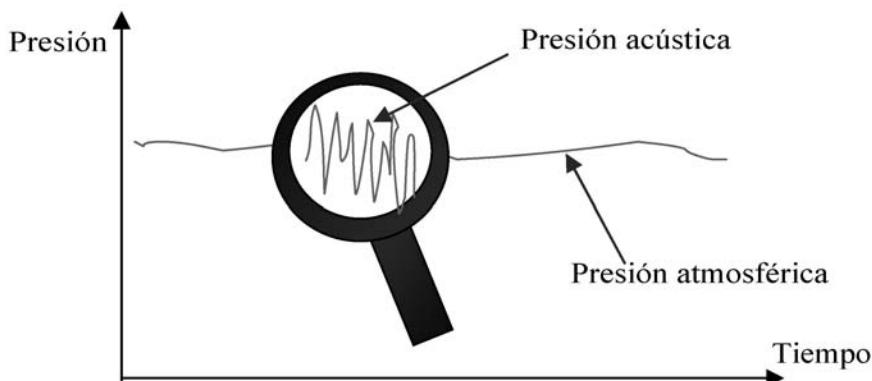


Fig. 1.1. La presión acústica (información audible) está a caballo de la presión atmosférica. Nótense las lentas variaciones de la presión atmosférica, que no son audibles.

Estas sobrepresiones y depresiones alrededor de la presión atmosférica, es lo que el sentido auditivo interpreta como sonido. La amplitud de estas variaciones de presión muestran el nivel sonoro, y su cadencia o repetición, la frecuencia o tonalidad del sonido. La forma de propagarse el sonido en el aire es por ondas llamadas de densidad. En el aire las partículas están separadas unas de las otras, de manera que pueden vibrar sin llegar a colisionar, pero interactuando entre sí. En las ondas de densidad, la vibración de una partícula hace vibrar a las más cercanas, las cuales a su vez hacen vibrar a otras y así progresivamente. De esta manera se consigue que la vibración inicial de la superficie del objeto se transmita a las partículas de aire más cercanas hasta llegar a otros puntos alejados del espacio. Las partículas de aire vibran con una cierta intensidad, dependiendo del nivel sonoro. Esta vibración se va atenuando con la distancia recorrida, y por tanto no tiene capacidad de recorrer grandes distancias. Sólo las fuentes sonoras de gran potencia pueden llegar a grandes distancias, como el ruido de aviación, una explosión, un trueno, o un equipo de sonido de gran potencia. Las partículas de aire vibran a una velocidad proporcional al nivel sonoro. No debe confundirse la velocidad de vibración de las partículas de aire ( $v$ ) con la velocidad de la onda acústica ( $c$ ). Esta última depende entre otros factores, de la temperatura, y es de unos 345 m/s a 22 °C. Las partículas de aire que transmiten el sonido no se desplazan por el espacio, únicamente vibran alrededor de un punto de equilibrio. Su desplazamiento sería posible en presencia del viento, por ejemplo. Durante el proceso de propagación de la onda acústica, se forman sobrepresiones y depresiones, estos cambios de presión viajan por el medio (generalmente aire) expandiéndose desde el punto donde se crearon. La presencia de viento favorable a la dirección de propagación, generalmente posibilita que el sonido pueda llegar más lejos que si el viento sopla en contra.

## 1.2. Atributos básicos del sonido.

**Nivel o amplitud del sonido.** Se interpreta como el nivel sonoro, a mayor amplitud mayor sensación auditiva, y se mide en Pascal. Existe un nivel umbral mínimo de percepción auditiva, por debajo del cual no es posible percibir ningún sonido. También existe un nivel máximo que no se puede superar sin correr el riesgo de perder de forma permanente la capacidad auditiva. Ambos umbrales se obtienen de forma estadística. Esto hace que algunas personas puedan percibir sonidos por debajo del umbral auditivo y también soportar presiones superiores.

**Frecuencia.** Es el número de vibraciones o de variaciones de la presión acústica por segundo, dando la sensación de tonalidad. Un sonido de baja

frecuencia es un sonido de tonalidad grave. Un sonido de alta frecuencia es un sonido de tonalidad aguda. Los sonidos que nos rodean tienen muchas frecuencias mezcladas, formando los llamados sonidos complejos. La mayoría de estos sonidos presentan un mayor contenido de baja frecuencia. Esto es debido a que las vibraciones de baja frecuencia son por un lado más fáciles de producir y por otro lado su capacidad de propagación es superior. Los ruidos que podemos percibir de origen natural o generados por el hombre tienen más del 95% de la energía concentrada en las bajas frecuencias. La frecuencia se mide en Hz (Hertz), donde 1 Hz es 1 ciclo por segundo. El margen de frecuencias que se considera en audiofrecuencia va de 20 Hz a 20.000 Hz, que coincide aproximadamente con la sensibilidad en frecuencia del oído.

**Longitud de onda.** Es sin duda el parámetro más importante en acústica. Aparentemente redundante, ya que erróneamente se considera que la frecuencia o el nivel son propiedades más importantes. La longitud de onda es la distancia en metros que una onda acústica ocupa en el medio por donde se propaga. Esta distancia depende de la velocidad del sonido en el medio de propagación y de la frecuencia. Generalmente el medio de propagación es el aire, pero como se ha dicho anteriormente también puede ser un líquido o un sólido.

La expresión que relaciona la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad del sonido es la ecuación (1.1):

$$c = \lambda \cdot f \quad (1.1)$$

Donde:

$c$  es la velocidad del sonido en el medio por donde se propaga y se expresa en m/s.

Para el aire a una temperatura ambiental de unos 22 °C la  $c = 345$  m/s.

Para el agua dulce a temperatura similar  $c = 1.500$  m/s.

Para un sólido a temperatura similar la velocidad  $c$  puede oscilar entre 100 m/s para los aerogels y los 6.100 m/s para el acero.

$\lambda$  es la longitud de onda del sonido, expresada en m.

$f$  es la frecuencia en Hz, de la onda acústica.

Así pues, un sonido con una frecuencia de 100 Hz que se propaga por el aire a una temperatura de unos 22 °C, tiene una longitud de onda de 3,45 m, mientras que una onda de 1.000 Hz tiene una longitud de onda de 0,345

m. Nótese que la baja frecuencia presenta una mayor longitud de onda. Esta propiedad le permite penetrar estructuras con mayor facilidad. Así, el ruido de tráfico en las ciudades que está formado principalmente por componentes de baja frecuencia puede entrar con facilidad en las casas por la fachada. En general las estructuras con grosorres muy pequeños comparados con la longitud de onda presentan una atenuación a la onda acústica de baja frecuencia, muy moderada. Es el caso del cristal de una ventana que con una densidad muy similar a la de la pared de cerámica, presenta un grosor de pocos milímetros comparado con la decena de centímetros de la pared. Su aislamiento acústico a bajas frecuencias será sin duda muy moderado. Las láminas y otros artilugios no consiguen mejorar este aislamiento. Nótese que el doble cristal ofrece el mismo aislamiento que un cristal equivalente a la suma de ambos. La cámara de aire de pocos milímetros que suelen tener estos cristales dobles, apenas mejora el rendimiento acústico. El cristal doble es ventajoso por aspectos de aislamiento térmico, y para evitar el efecto de condensación.

Para una frecuencia de 20 Hz la longitud de onda en el aire es de 16,5 m. aproximadamente y para 20.000 Hz es solo de 16,5 mm. En acústica se trabaja con señales con longitudes de onda decamétricas y milimétricas. Esto crea un grave problema no solo al realizar mediciones con garantías, sino a la hora de controlar con métodos de ingeniería el nivel sonoro. Este margen en frecuencia equivale en radiofrecuencia a las ondas de radio llamadas "largas" y las ondas de los radio enlaces por microondas. En ambos casos las antenas para captar y enviar las señales son totalmente distintas, así como los circuitos electrónicos asociados. En acústica se utiliza el mismo equipo de medida con el mismo micrófono y con los mismos procedimientos de medida para cualquier frecuencia. Evidentemente los resultados obtenidos, en muchas ocasiones no se ajustan a la realidad. Con demasiada frecuencia se olvida que algunos fenómenos físicos no se producen por igual a todas las frecuencias. Las soluciones a adoptar pueden ser radicalmente distintas en función del origen del problema. Materiales y soluciones constructivas correctas para unas frecuencias pueden ser ineficaces para otras, por los distintos comportamientos que un material ofrece para distintas frecuencias.

### **1.3. Medida del nivel sonoro. El decibelio.**

Como se ha comentado anteriormente, la presión acústica es la magnitud física que indica si un sonido es más fuerte que otro. La unidad de medida de presión es el Pascal, pero es una magnitud que resulta excesivamente grande para indicar los niveles que el oído puede captar. Se pueden utilizar

los submúltiplos, el mPa o el  $\mu$ Pa. Al margen de la escala de niveles, el oído puede detectar variaciones de presión acústica entre los 20  $\mu$ Pa como un umbral auditivo y los 200 Pa como un umbral máximo de audición. La presión atmosférica normal se sitúa entorno a los 10.000 Pascal. Representar en una escala lineal estos niveles resulta imposible ya que la gran diferencia de orden de magnitud precisaría de una escala imposible de representar gráficamente. Weber sugirió que un cambio en la respuesta subjetiva R es proporcional a un cambio en la respuesta del estímulo S.

$$\delta R \propto \frac{\delta S}{S} \quad (1.2)$$

Integrando la expresión (1.2) se obtiene que la respuesta es proporcional al logaritmo del estímulo.

$$R = k \cdot \log S \quad (1.3)$$

En consecuencia, la sensibilidad auditiva no sigue una ley lineal con la presión acústica sino una relación logarítmica. Este aspecto es el que conduce a utilizar una escala de medida del nivel sonoro logarítmica, el Belio. Pero el Belio también es una magnitud muy grande y se utiliza un submúltiplo: el decibelio (décima parte del Belio). Así pues los niveles de sonido se miden en decibelios (dB). El decibelio pues es la relación logarítmica del cociente de presión recibida respecto de la presión de referencia, como muestra la expresión (1.4).

$$dB = 20 \cdot \log \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (1.4)$$

Donde:

$P$  es la presión acústica percibida en el punto de medida.

$P_0$  es la presión de referencia.

Cuando la presión de referencia es de 20  $\mu$ Pa entonces los decibelios se llaman SPL (Sound Pressure Level). Normalmente los decibelios de sonido siempre son SPL, ya que en las mediciones acústicas se utiliza siempre la misma referencia (20  $\mu$ Pa). En la práctica normalmente no se suele indicar que los decibelios son SPL, ya que asume que siempre la referencia es la misma. La expresión (1.4) queda como:

$$dB_{SPL} = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{p_0}\right) \quad (1.5)$$

Pero cuando se mide la presión acústica en un medio que no sea el aire, por ejemplo dentro del agua, la referencia pasa a ser de  $1 \mu\text{Pa}$ . Esto hace que los niveles de presión acústica dentro de un líquido expresados en decibelios sean 26 dB más elevados que los niveles en el aire. Los decibelios de nivel sonoro medidos en un líquido evidentemente no son SPL. Con frecuencia se lee en algún medio de comunicación que los niveles de ruido en el mar son muy elevados. Eso es totalmente cierto, pero se confunde al lector con las cifras mostradas, ya que estos niveles son con referencia a  $1 \mu\text{Pa}$  y no  $20 \mu\text{Pa}$ .

#### **1.4. La intensidad sonora.**

La intensidad sonora hace referencia a la energía acústica que recibe el oído. Esta magnitud depende del nivel y de la superficie afectada. Para un mismo nivel sonoro, a mayor superficie, menos intensidad. La intensidad acústica es proporcional a la presión cuadrática.

$$I \propto p^2 \quad (1.6)$$

El nivel de intensidad sonora expresada en decibelios será pues:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{p_0}\right)^2 = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.7)$$

Donde:

$I$  es la intensidad acústica en el punto de medida.

$I_0$  es la intensidad acústica de referencia.

La intensidad acústica se expresa en  $\text{W/m}^2$ . Esta potencia es la de la fuente acústica expresada en Watts acústicos.

Para ondas planas la intensidad acústica es:

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad (1.8)$$

Donde:

P es la presión acústica en el punto de medida.

$\rho$  es la densidad del aire a la temperatura ambiente.

c es la velocidad del sonido.

Cuando el medio de propagación del sonido es el aire, al producto  $\rho c$  se le llama impedancia característica del aire. A partir de la expresión anterior se puede determinar cual es la referencia en la medida de intensidad acústica. A partir del umbral auditivo del oído de  $20 \mu\text{Pa}$  y de la impedancia característica del aire  $\rho c = 411 \text{ Rayls}$  a  $22^\circ\text{C}$ , se obtiene:

$$\text{Intensidad}_{\text{referencia}} = \frac{(20\mu\text{Pa})^2}{411} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (1.9)$$

### 1.5. La potencia sonora.

La fuerza o capacidad de hacer ruido de una máquina se evalúa con su potencia sonora. Esta magnitud nos permite calcular el nivel de presión acústica en cualquier punto situado ya sea en un espacio cerrado o abierto. La potencia sonora es una propiedad de cada fuente sonora y es medida en Watts acústicos, que no deben confundirse con los Watts eléctricos. Un amplificador puede ser de 200 W, y la voz humana tiene una potencia del orden de 0,001 W, pero las dos potencias no son lo mismo aunque que el símbolo sea el mismo. En el primer caso son Watts eléctricos, mientras que en el segundo caso son Watts acústicos.

Normalmente la potencia acústica de una fuente sonora se indica en decibelios. Para pasar de Watts acústicos a decibelios se utiliza la expresión (1.10).

$$L_w = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (1.10)$$

Donde:

W es la potencia acústica de la fuente en Watts.

$W_0$  es la potencia de referencia.

La mayoría de máquinas de uso exterior, llevan una etiqueta donde se indica el nivel de potencia acústica  $L_w$  expresado en decibelios. Este nivel no debe confundirse con la presión acústica que recibe el usuario o personas cercanas. Esta presión acústica deberá ser determinada por cálculo o medida y depende de las condiciones de contorno en los que trabaje la máquina.

### 1.6. Operaciones con decibelios.

Los decibelios no pueden sumarse o restarse algebraicamente, ya que son magnitudes logarítmicas, por tanto  $30 \text{ dB} + 30 \text{ dB}$  no dan  $60 \text{ dB}$ . La forma más simple para sumar, es pasar los decibelios a intensidades, sumar éstas y hacer la conversión a logaritmo. Por ejemplo: Se suman tres fuentes de ruido una de  $55 \text{ dB}$  una de  $58 \text{ dB}$  y una tercera de  $57 \text{ dB}$ .

El nivel global se halla con la expresión:

$$\text{Nivel\_total} = 10 \cdot \log \left( 10^{\left(\frac{55}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{58}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{57}{10}\right)} \right) = 61,6 \text{ dB} \quad (1.11)$$

En la operación de la suma de decibelios, algunos cálculos pueden realizarse de forma simple para valores que cumplan unas determinadas condiciones. Así si una fuente presenta un nivel  $10 \text{ dB}$  inferior a la más cercana en valor, su contribución al nivel SPL total es despreciable. Por ejemplo, una fuente de ruido de  $63 \text{ dB}$  es despreciable ante una fuente de  $73 \text{ dB}$  o superior. Además, si dos fuentes sonoras tienen el mismo nivel de presión acústica, el nivel total se incrementa en  $3 \text{ dB}$ . Por ejemplo, dos fuentes de ruido de  $58 \text{ dB}$  cada una, producen un valor juntas de  $61 \text{ dB}$ .

La suma de decibelios en los casos expuestos anteriormente, suponen que las fuentes sonoras consideradas son incoherentes (ver capítulo 2, punto 2.4), aspecto que en general suele ser cierto en la mayoría de casos. La gran mayoría de fuentes sonoras son incoherentes, y la suma de dos fuentes que radian la misma presión acústica incrementa el nivel sonoro en  $3 \text{ dB}$ . Nótese que aunque el nivel sonoro en un punto sea el mismo, no significa que la potencia acústica de las fuentes sea la misma, ya que una de ellas podría estar más cercana al punto de medida.

### 1.7. Promediado de decibelios.

En ocasiones es útil promediar valores de nivel de presión sonora expresados en decibelios. A la hora de promediar podemos utilizar dos

métodos: el aritmético y el geométrico (llamado también promedio energético). El promediado aritmético es el más utilizado, pero el geométrico suele ser el más adecuado. Usar uno u otro método depende del tipo de señal que se está promediando. Las diferencias entre ambos métodos son muy pequeñas cuando los valores son cercanos. Pero cuando los valores presentan mayor dispersión el valor final tiene una mayor influencia del valor mayor, ya que se trata de un promedio energético. El problema de los promedios está en la selección o validación de las mediciones. Una medición o mediciones incorrectas pueden hacer que el resultado promediado quede muy distante del valor real, cometiendo un error muy importante. La validación de los resultados de una medida es una tarea frecuentemente olvidada pero fundamental a la hora de hacer un informe.

Por ejemplo, la medida del ruido de fondo con una integración de 1 minuto, dentro de una habitación en período nocturno da como resultado:

|          | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Medida 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| Nivel dB | 28,2     | 27,1     | 28,6     | 27,9     |

El valor promediado queda:

| Promediado | Aritmético | Geométrico |
|------------|------------|------------|
| Nivel dB   | 27.950     | 27.984     |

Se han expresado en este ejemplo los valores en decibelios con 3 decimales para mayor claridad. El número de decimales no significa que la medida sea más precisa, sino que más bien pone en evidencia el desconocimiento de quien recurre a ello pensando en qué tiene mayor precisión. Debe tenerse siempre presente a qué corresponden los valores de ruido medidos. En el ejemplo anterior, se trata de ruido de fondo. ¿Realmente el ruido de fondo será de 28 dB? ¿Hasta qué punto el valor más bajo 27,1 dB indica realmente el ruido de fondo? Siendo el ruido de fondo conceptualmente el ruido residual en el punto de medida, debería considerarse al valor más bajo como el valor probablemente más cercano a la realidad. En el ejemplo el nivel de integración de 1 minuto puede ser excesivo para determinar el valor real del ruido de fondo, ya que probablemente, durante ese minuto, aparecen ruidos ajenos que elevan el nivel de ruido medido. Las mediciones donde se da un solo valor como resultado de una medición acústica de una duración preestablecida, son en ocasiones erróneas. Ese valor obtenido puede estar contaminado por ruidos ajenos que se produzcan durante el tiempo de medida. Únicamente con una selección de muestras temporal de la señal será posible verificar la exactitud

y veracidad de dichas mediciones. Esto obliga a hacer un post-procesado de la señal y una validación del fragmento de señal medido. No todo lo que se mide durante un intervalo de tiempo es válido. En ocasiones debe desecharse parte de la medición.

El ejemplo siguiente muestra un caso hipotético donde tres de los cuatro valores son iguales. Se muestran dos casos complementarios, un valor elevado y el resto bajos y viceversa.

|            | Medida 1   | Medida 2   | Medida 3 | Medida 4 |
|------------|------------|------------|----------|----------|
| Nivel dB   | 27         | 35         | 27       | 27       |
| Promediado | Aritmético | Geométrico |          |          |
| Nivel dB   | 29,000     | 30,669     |          |          |

El valor promediado queda:

| Promediado | Aritmético | Geométrico |
|------------|------------|------------|
| Nivel dB   | 29,000     | 30,669     |
| Promediado | Aritmético | Geométrico |
| Nivel dB   | 29,000     | 30,669     |

Para el caso complementario:

|            | Medida 1   | Medida 2   | Medida 3 | Medida 4 |
|------------|------------|------------|----------|----------|
| Nivel dB   | 35         | 35         | 27       | 35       |
| Promediado | Aritmético | Geométrico |          |          |
| Nivel dB   | 33,000     | 33,974     |          |          |

El valor promediado queda:

| Promediado | Aritmético | Geométrico |
|------------|------------|------------|
| Nivel dB   | 33,000     | 33,974     |
| Promediado | Aritmético | Geométrico |
| Nivel dB   | 33,000     | 33,974     |

Es remarcable la influencia devastadora de un valor más elevado sobre el resultado final, mientras que el caso contrario no es tan influyente. En el primer caso el valor más probable es el 27, y sin embargo el promedio energético da 30,7 dB, un error de 3,7 dB al alza.

En el segundo caso el valor más probable es el 35 dB, y el promedio energético da 34 dB, un error de 1 dB por debajo.

En los dos casos expuestos anteriormente sería necesario realizar una selección de datos, empleando cualquier técnica estadística como la desviación típica para establecer un margen de aceptación o rechazo de la medida. Dicha selección debe realizarse teniendo en cuenta a qué corresponden los niveles de ruido. Por ejemplo si es ruido de fondo, deberían prevalecer los niveles más bajos. Caso de ser nivel de inmisión sonora procedente de una actividad será más adecuado el promedio geométrico, siempre que la fuente de ruido tenga un nivel variable.

## Capítulo 2

### PROPAGACIÓN DEL SONIDO

#### 2.1. Ondas transversales y longitudinales.

La figura 2.1. muestra el fenómeno de la formación de una onda acústica en el aire en dos dimensiones. Se trata de una onda longitudinal. En una onda longitudinal, el desplazamiento de las partículas es paralelo a la dirección de desplazamiento de la onda acústica. La figura 2.1. ilustra el efecto de accionar un pistón dentro de un tubo. El pistón tiene un movimiento vibratorio horizontal, y ajusta perfectamente en el tubo. Cuando el pistón se desplaza a la derecha “comprime” las partículas de aire. De hecho las junta, formando los máximos de presión. Cuando el pistón se desplaza hacia la izquierda, se forma una depresión y esto origina el mínimo de presión. Estos máximos y mínimos de presión se van desplazando, conservando su distancia, de izquierda a derecha en este caso y no se quedan estáticos en una posición. Este desplazamiento no implica que las partículas se desplacen sino que es la onda acústica la que lo hace. Se muestra en un instante T la distribución de presiones dentro del tubo. El desplazamiento de la onda acústica, a la temperatura ambiental, es de unos 345 m/s. Cabe destacar que las partículas de aire realmente no se desplazan de izquierda a derecha, sino que vibran alrededor de un punto de equilibrio.

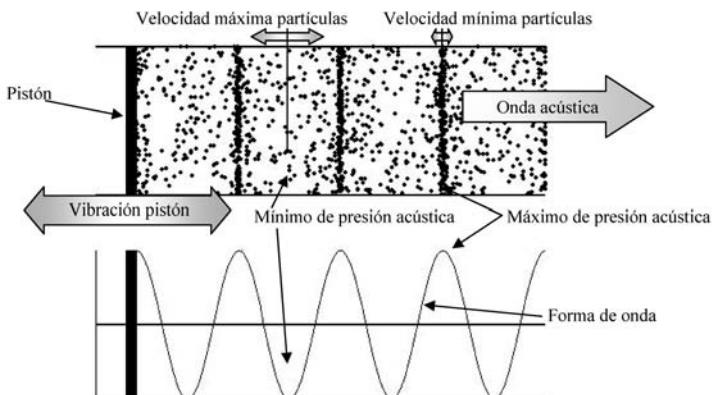


Fig. 2.1. Onda acústica longitudinal. Los puntos representan partículas de aire. Nótese como los máximos de presión coinciden con la proximidad de partículas y corresponden a un mínimo de velocidad de las partículas.

La onda acústica es un fenómeno asociado a una vibración, pero no comporta ningún desplazamiento físico de materia. En una onda transversal, el desplazamiento de las partículas sobre su punto de equilibrio es perpendicular al sentido de propagación de la onda acústica. Un ejemplo sería una cuerda atada por un extremo a una pared rígida. Si el otro extremo se desplaza arriba y abajo, se genera una onda que se desplaza hacia el punto de fijación. Las ondas en la superficie del agua son una combinación de ondas transversales y ondas longitudinales. Si nos fijamos atentamente en un punto situado en la superficie, veremos que éste sube y baja, pero al mismo tiempo también avanza y retrocede en la dirección de propagación de la onda. Esta trayectoria como podemos observar en la figura 2.2. es un círculo.

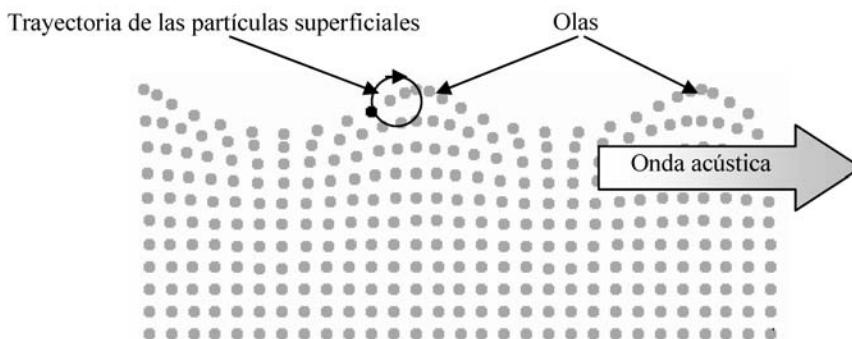


Fig. 2.2. Movimiento de una partícula sobre la superficie del agua. Nótese que su movimiento describe una trayectoria circular.

## 2.2. Tipo de fuentes acústicas.

Se llama fuente acústica a cualquier elemento que radia sonido. Si escuchamos un sonido, es porque en algún lugar alguna cosa vibra. Las vibraciones son siempre el origen del sonido. Las vibraciones pueden ser perceptibles por el cuerpo humano en función de su amplitud y frecuencia. Las bajas frecuencias si son de amplitud suficiente se pueden detectar fácilmente a través del cuerpo, mientras que las altas frecuencias no son perceptibles corporalmente, pero si que podemos llegar a escuchar su efecto, cuando una superficie está vibrando. Una fuente acústica puede ser un altavoz, una lavadora, etc. Las vibraciones, generalmente, se asocian a fenómenos que “se perciben” con el cuerpo, por ejemplo un temblor. En este caso es una vibración llamada de baja frecuencia, que probablemente no será audible por vía ótica (por el oído) sino por vía corpórea. Si se observa el movimiento de un altavoz de una caja acústica (bafle), se podrá ver vibrar el cono del altavoz de baja frecuencia. En cambio el altavoz pequeño, el de los agudos,

no se llega a ver que vibre. Las vibraciones de alta frecuencia generalmente llevan asociados niveles de desplazamiento muy pequeños, imperceptibles a simple vista y no detectables en contacto con los dedos. Sin las vibraciones el sonido no podría existir. Es necesario tener presente que la vibración de un elemento genera el sonido, y que es necesaria alguna cosa que permita que nos llegue. Este elemento generalmente suele ser el aire que nos rodea, aunque también podría ser un líquido o un sólido. Para que un objeto que vibra radie sonido es necesario que éste presente una determinada superficie y pueda desplazar un buen número de partículas de aire. A mayor superficie, mayor nivel sonoro radiado, pero también mayor inercia y en consecuencia menor contenido de frecuencias altas. Por otro lado, a mayor superficie existe una mayor dificultad para que ésta pueda vibrar. Las placas metálicas de un tren cuando vibran, radian principalmente baja frecuencia. Las superficies de una aspiradora también vibran pero no pueden radiar esas bajas frecuencias.

Las fuentes sonoras pueden ser direccionales o bien omnidireccionales. Las primeras radian el sonido en una dirección preferente del espacio, por ejemplo una bocina. Las segundas radian el sonido en todas las direcciones del espacio. Esta propiedad de la fuente depende de sus dimensiones, de las frecuencias radiadas y de su ubicación. El caso más sencillo es el de la fuente omnidireccional. La mayoría de fuentes, a bajas frecuencias, suelen ser de este tipo. Por ejemplo: una caja acústica, una persona, un coche parado, etc. El frente de ondas que genera la fuente se propaga en todas las direcciones posibles de manera uniforme. Este tipo de fuentes acústicas se llama fuente puntual.

Fuente puntual quiere decir que se substituye la fuente real por un punto en el espacio. Este punto da la referencia para evaluar distancias y trazar trayectorias del sonido. Una fuente omnidireccional radia ondas esféricas. Pero esto no quiere decir que la forma de estas ondas sea realmente esférica. La figura 2.3. muestra el ejemplo de dos fuentes esféricas. A la izquierda una fuente acústica que radia en forma esférica, a la derecha una que radia en forma de elipsoide.

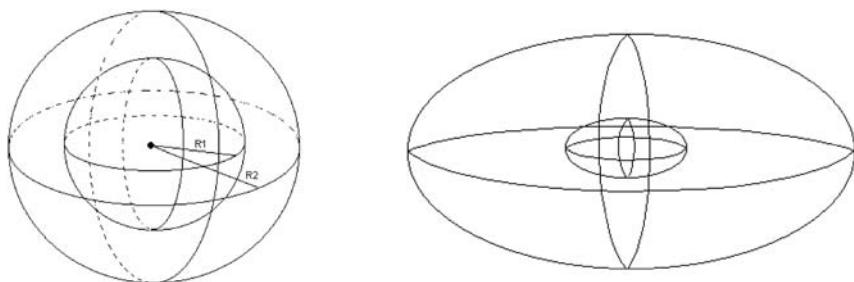


Fig. 2.3. A la izquierda una radiación en forma esférica. A la derecha en forma de elipsoide. En ambos casos se trata de radiaciones de ondas esféricas.