

FÍSICA DEL SONIDO

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE y METROLOGÍA



Coordinadora PROCAME

M.Sc. Ligia Bermúdez Hidalgo

Equipo de trabajo:

Msc. Manfred Murrell

Licda. Claudia Mannix

Licda. Karla Vetrani

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA

1

ÍNDICE

2 PERFIL DEL CURSO	4
3 INTRODUCCIÓN.....	6
4 CONCEPTOS BÁSICOS	7
4.1 Glosario del sonido.....	7
4.2 Características o cualidades del sonido	19
4.3 Unidad de medida	20
4.4 Ejercicios.....	21
5 PROPAGACIÓN DEL SONIDO	22
5.1 Propagación.....	23
5.2 Compresión y rarefacción	23
5.3 Ondas de sonido	24
5.4 Excitación periódica	25
5.5 Presión Sonora	23
5.6 Representación de una onda sonora.....	27
5.7 Velocidad, longitud de onda y frecuencia de una onda sonora.....	27
5.8 Difracción.....	28
5.9 Reflexión	29
5.10 Pulsaciones.....	29
5.11 Oscilaciones.....	30
6 EFECTO DOPPLER.....	32
6.1 Ondas estacionarias	33
6.2 Interferencia.....	33
6.3 Cuerdas vibrantes	36
6.4 Resonancia	36
6.5 Infrasonido y ultrasonido	23
6.6 Ejercicios.....	39
7 FENOMENOS ONDULATORIOS	40

7.1 Reflexión y refracción del sonido	40
7.2. Absorción y aislamiento acústico	41
7.3. Reverberación	42
7.4. Eco	42
7.5. Otros conceptos	42
7.6. Ejercicios	42
8. Conceptos utilizados en el estudio de los niveles de ruido	43
8.1 Espectro	47
8.2 Banda octava	48
8.3 Nivel de presión sonora	50
8.3.1 Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente (NPSeq)	50
8.3.2 Nivel de Presión Sonora Máximo (NPSmax)	50
8.3.3 Nivel de Presión Sonora Mínimo (NPSmin)	50
8.4 Curva de ponderación	51
8.5. Ejercicios	42
9 SUMA DE NIVELES DE PRESIÓN ACÚSTICA EN DECIBELES	53
10 RESPUESTAS DE EJERCICIOS	61
Capítulo 4	61
Capítulo 5	61
Capítulo 6	62
Capítulo 7	62
Capítulo 8	62
Capítulo 9	62
11 BIBLIOGRAFIA	65
12 LINKS DE INTERÉS	67

2

PERFIL DEL CURSO

Objetivo general

- Conocer y utilizar conceptos, propiedades e instrumentos necesarios en el ámbito de la física del sonido con el fin de que puedan ser utilizados en las mediciones de sonido.

Objetivos específicos

- Conocer, conceptualizar y discutir las propiedades referentes a la física del sonido.
- Identificar los factores que intervienen en la propagación del sonido
- Conocer y conceptualizar los factores de estudio de los niveles de ruido.

Dirigido a

- Estudiantes, especialistas y técnicos vinculados con gestión ambiental, salud ocupacional, industria y comercio y actividades afines.

Contenido temático

- Nivel de presión sonora vrs presión sonora
- Longitud de onda
- Frecuencia
- Período
- Velocidad del sonido en diferentes medios
- descomposición espectral del ruido Intensidad y potencia acústica
- Reflexión, difusión y absorción.
- Operaciones con dB suma, resta, y promedio energético
- Banda octava, curva de ponderación, nivel de presión sonora equivalente

Estrategia metodológica

- Exposición/presentación por parte del instructor

- Trabajo individual
- Evaluación cualitativa y sistemática de los participantes a través de sus intervenciones y de su participación en foros de discusión
- Recursos audiovisuales.
- Análisis de casos y prácticas.

Duración

- 30 horas. El curso se impartirá 20 horas en cinco sesiones de cuatro horas cada una de forma virtual y 10 horas en un Proyecto Asistido a Distancia.

Evaluación

- Examen final 70%
- Foro 30%

3 INTRODUCCIÓN

Una cosa es la definición física del sonido, y otra la sensación fisiológica del mismo. El sonido en sí es cierta forma de onda; En cualquier disturbio vibratorio que, propagado a través de un medio elástico, causa una alteración en la presión del medio capaz de producir una sensación auditiva en una persona con audición normal, o de poder ser detectada por un instrumento de captación dentro del rango de frecuencias e intensidades de percepción del oído. Origina en dicho medio una serie de compresiones y enrarecimientos, desplazándose a través de esta a una velocidad que depende de la naturaleza del mismo medio. El sonido se propaga a través de medios gaseosos (Por ejemplo el aire), pero también lo hace en medios líquidos y gaseosos.

En este curso estudiaremos la física del sonido como tal, conceptos básicos, propagación, factores que involucran el estudio de los niveles de ruido, cálculos de suma y resta de decibeles, entre otros puntos.

4

CONCEPTOS BÁSICOS

4.1 Glosario del sonido

El **sonido** se define como toda sensación auditiva que tiene por origen una onda acústica que proviene de una vibración (Chinchilla, 2013). Una definición más extensa la encontramos dentro del Reglamento para el control de la contaminación por ruido *“es el fenómeno vibratorio en el cual la materia se pone en vibración de tal forma que se afecta su densidad. Los cambios en la densidad de la materia (por lo tanto en la presión sonora que ejerce) habrán de ser rítmicos o periódicos”*.

Es por ello que se define al **ruido** como aquella emisión de energía originada por un fenómeno vibratorio que es detectado por el oído y provoca una sensación de molestia. (MAAM, 2011).

Un ruido es la sensación auditiva no deseada correspondiente generalmente a una variación aleatoria de la presión a lo largo del tiempo. Es un sonido complejo, y puede ser caracterizado por la frecuencia de los sonidos puros que lo componen y por la amplitud de la presión acústica correspondiente a cada una de esas frecuencias. Si estas últimas son muy numerosas, se caracteriza entonces el ruido por la repartición de la energía sonora en bandas de frecuencias contiguas, definiendo lo que se denomina espectro frecuencial del ruido. El espectro de frecuencias de un ruido varía aleatoriamente a lo largo del tiempo, a diferencia de otros sonidos complejos, como los acordes musicales, que siguen una ley de variación precisa. (MAAM, 2011).

Existen multitud de variables que permiten diferenciar unos ruidos de otros: su composición en frecuencias, su intensidad, su variación temporal, su cadencia y ritmo, etc.

a. Frecuencia

La frecuencia es el elemento que determina el tono de los sonidos.

Se puede medir en hercios (Hz). De acuerdo con el tipo de frecuencia (alta, baja o media), el sonido podrá tener tres tonos diferentes, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N°1 Tipos de sonido y frecuencia

Tipo de sonido	Tipo de frecuencia	Rango	ejemplo
Grave	Baja	20 Hz a 500 Hz	Compresor
Agudo	Alta	2000 Hz a 20000 Hz	Silbato, sirena, sierra
Medio	Media o convencional	500 Hz a 2000 Hz	Voz humana

Fuente: Claudia Mannix S, base en el texto de Ryan Chinchilla Sibaja, 2013. Salud y Seguridad en el Trabajo, pág 111.

Las frecuencias más **bajas** se corresponden con lo que habitualmente llamamos sonidos "**graves**", son sonidos de vibraciones lentas. Ejemplo la sirena de un barco. Las frecuencias más **altas** se corresponden con lo que llamamos "**agudos**" y son vibraciones muy rápidas. Ejemplo canto de un ave. (PROCAME, 2007).

Los sonidos agudos son los más agresivos debido a que provocan una mayor molestia a los seres humanos. El oído humano (MAAM, 2011), puede percibir sonidos en una frecuencia entre los 20 y 20 000 hertzios. La voz humana se encuentra en rango entre los 100 y 8000 Hz, una conversación normal varía entre los 500 y 3000 Hz.

Las frecuencias menores a los 20 Hz se denominan **infrasonidos** y aquellas superiores a los 20000 Hz se denominan como **ultrasonidos**. (MAAM, 2011).

b. Intensidad

La intensidad de sonido se define como la potencia de sonido por unidad de área (wattios/m²). La intensidad de sonido es una cantidad vector; es decir, se especifica por dirección.

El sonido que se origina en un punto irradia la potencia de sonido uniformemente en todas direcciones, asumiendo que no hay superficies reflectoras presentes. (Miki;Burgess, 2009) Mientras se disemina el poder esféricamente desde su fuente, el área de superficie aumenta y por lo tanto la potencia por unidad de área disminuye. El total de la potencia sigue

siendo el mismo, pero el área que engloba está aumentando, lo que produce una reducción de la intensidad de sonido. Esto se conoce como la *ley de la inversa de los cuadrados*.

- El área de superficie de la esfera = $4\pi r^2$
- A 1 metro de la fuente, $r=1$ y la potencia se disemina por una esfera con un área de superficie de $4\pi \times 1$
- A 2 metros, $r=2$ y la superficie de la esfera será $4\pi \times 4$; es decir, 4 veces más grande.
- A 3 metros la superficie será $32 = 9$ veces más grande, por lo tanto, a medida que aumenta la distancia de la fuente, la energía por unidad de área disminuye.

La intensidad del ruido se mide con un instrumento conocido como **sonómetro**, este aparato cuenta con 5 filtros: A, B, C, D, E. La escala A puede detectar una gama de sonidos semejantes a la captada por el ser humano, es por esta razón que se admite tomar todas las medidas en dB(A), independientemente del sonido del tipo de sonido emitido y es la escala más utilizada.

c. Potencia

La potencia de sonido se define como la energía total de sonido generada por la fuente por unidad de tiempo. La potencia de sonido se expresa en unidades de watios (W).

Cabe tener presente que para todas las situaciones prácticas la potencia de sonido generada por la fuente es constante, independiente de su ubicación (es decir, dentro versus fuera). A la inversa, la intensidad de sonido y la presión de sonido cambian en base al ambiente en que se ubica. (Miki; Burgess, 2009).

d. Onda sonora

Una onda es una perturbación que avanza o que se propaga en un medio material o incluso en el vacío. Cuando estas ondas necesitan de un medio

material, se llaman **ondas mecánicas**. Las únicas ondas que pueden propagarse en el vacío son las **ondas electromagnéticas**

El sonido es un tipo de onda mecánica que se propaga únicamente en presencia de un medio material.

Un cuerpo al vibrar imprime un movimiento de vaivén (oscilación) a las moléculas de aire que lo rodean, haciendo que la presión del aire se eleve y descienda alternativamente. Estos cambios de presión se transmiten por colisión entre las moléculas de aire y la onda sonora es capaz de desplazarse hasta nuestros oídos. Las partes de la onda en que la presión aumenta (las moléculas se juntan) se llaman compresiones y aquellas en que la presión disminuye (las moléculas se alejan) se llaman enrarecimientos.

Según la dirección de propagación, clasificamos las ondas en dos tipos:

- *Ondas Longitudinales:*

Es cuando la vibración de la onda es paralela a la dirección de propagación de la propia onda. Estas ondas se deben a las sucesivas compresiones y enrarecimientos del medio, de este tipo son las **ondas sonoras**. Un resorte que se comprime y estira también da lugar a una onda longitudinal.

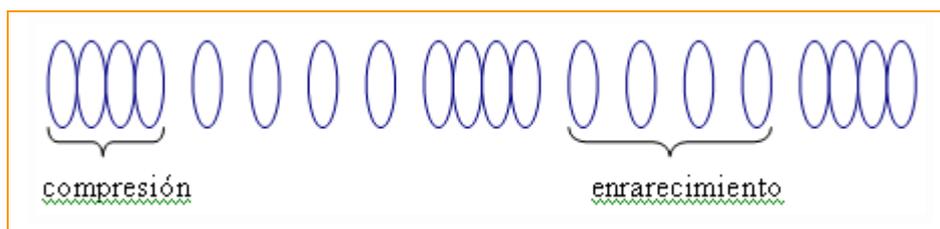


Imagen N°1. Ondas longitudinales, tomado de Mikl;Burgess, 2009

El sonido se transmite en el aire mediante ondas longitudinales.

Otro ejemplo de onda longitudinal es aquella que se produce cuando se deja caer una piedra en un estanque de agua, Se origina una perturbación que se propaga en círculos concéntricos que, al cabo del tiempo, se extienden a todas las partes del estanque.

- **Ondas Transversales:**

Donde la vibración es perpendicular a la dirección de la onda. Las ondas transversales se caracterizan por tener montes y valles. Por ejemplo, las ondas que se forman sobre la superficie del agua al arrojar una piedra o como en el caso de una onda que se propaga a lo largo de una cuerda tensa a la que se le sacude por uno de sus extremos.

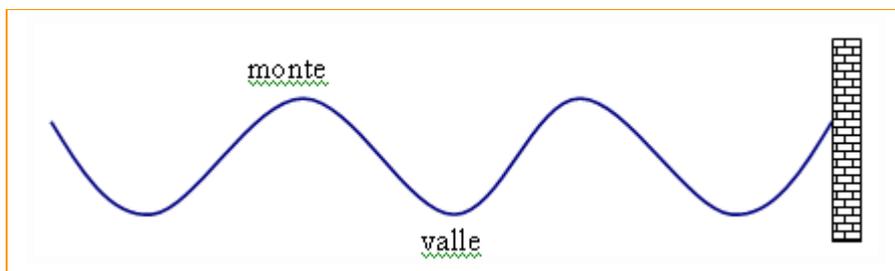


Imagen N°2. Ondas transversales, tomado de Mikl;Burgess, 2009

Características generales o elementos de las ondas

- **Tren de ondas:** Todas las ondas al moverse lo hacen una tras otra como si fuera un tren de donde se coloca un vagón tras otro.

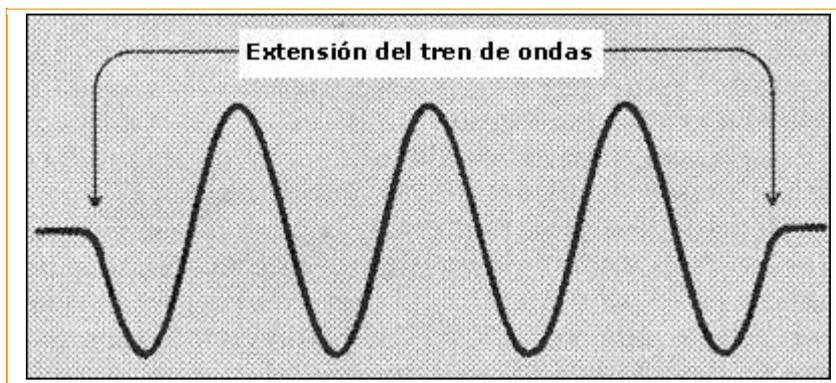


Imagen N°3. Tren de ondas, tomado de Mikl;Burgess, 2009

- **Nodo:** Es el punto donde la onda cruza la línea de equilibrio.

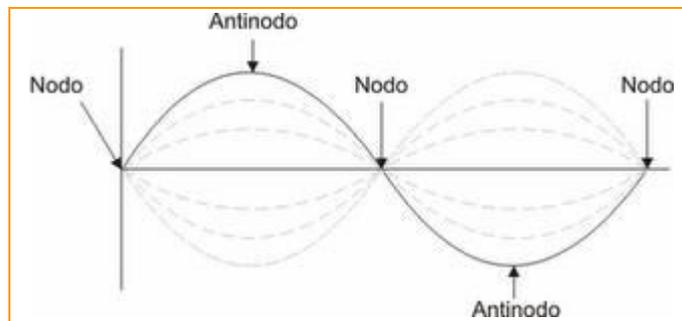


Imagen N°4. Nodo, tomado de Mikl;Burgess, 2009

- **Elongación:** Es la distancia entre cualquier punto de onda y su posición de equilibrio.
- **Cresta, monte o pico:** es el punto más alto de una onda
- **Valle:** Es el punto más bajo de una onda.

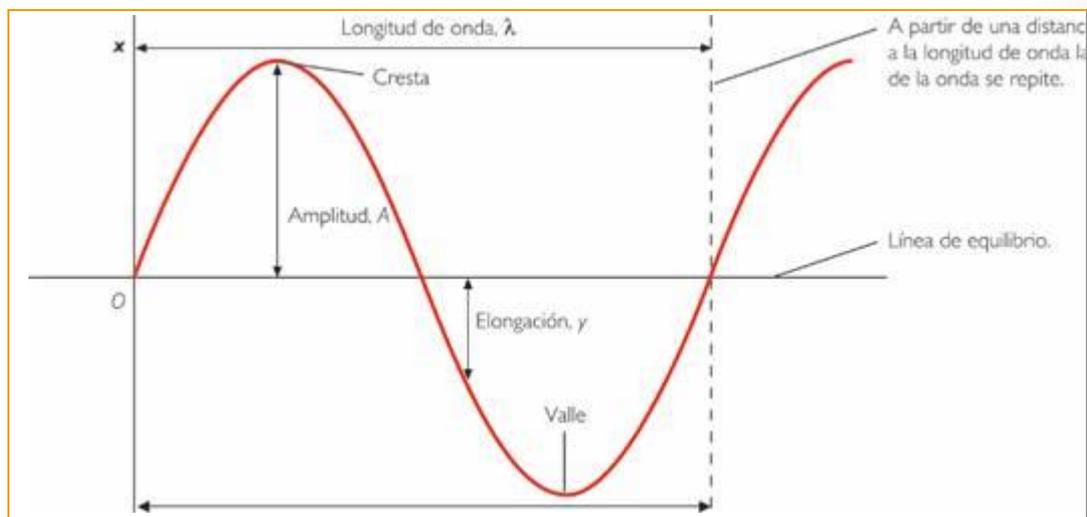


Imagen N°5. Estructura de las ondas, tomado de Mikl;Burgess, 2009

- **Periodo:** Tiempo que tarda en efectuarse una onda o vibración completa, se mide en segundos o s/ciclo se representa con una T mayúscula.

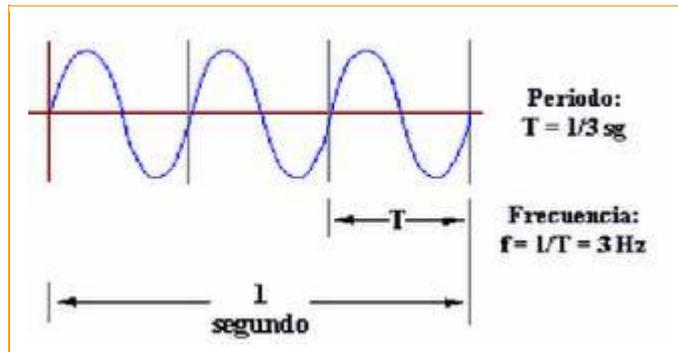


Imagen N°6. Periodo, tomado de Mikl;Burgess, 2009

Notemos que el periodo (T) es igual al recíproco de la frecuencia (f) y viceversa.

- **Amplitud (A):** Es la máxima separación de la onda o vibración desde su punto de equilibrio.

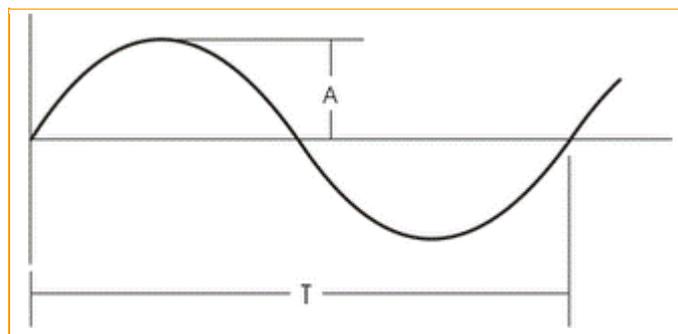


Imagen N°7. Amplitud, tomado de Mikl;Burgess, 2009

e. Longitud de onda

La longitud de onda (λ) es la longitud de un ciclo completo y se mide en metros (m), es la distancia que recorre una onda sonora en el tiempo de un periodo y se relaciona con la frecuencia (f) y la velocidad del sonido (c) por la siguiente fórmula:

$$\text{Longitud de onda } (\lambda) = c/f \text{ metros}$$

Velocidad de propagación: Es la relación que existe entre un espacio recorrido igual a una longitud de onda y el tiempo empleado en recorrerlo.

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA

Se indica con la letra **V** y es igual al producto de la frecuencia (f) por la longitud de onda (λ).

Matemáticamente se expresa así:

$$V = \lambda \cdot f$$

Por lo tanto

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

Fórmula que nos indica que la longitud de onda λ y la frecuencia **f** son dos magnitudes inversamente proporcionales, es decir que cuanto mayor es un tanto menor es la otra.

Periodo: Es el tiempo (en segundos) que tarda un punto en realizar una oscilación completa al paso de una onda. Se abrevia con la letra (T).

La frecuencia (f) se relaciona con el periodo según la fórmula

$$f = \frac{1}{T_{\text{seg}}}$$

Volvamos a la fórmula

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

Para reemplazar en ella **f (frecuencia)**, y nos queda la fórmula

$$V = \lambda \cdot \frac{1}{T_{\text{seg}}}$$

$$V = \frac{\lambda}{T_{\text{seg}}}$$

Lo cual nos indica que también podemos calcular la velocidad si conocemos la longitud (λ) y el periodo (en segundos) de una onda.

Como vemos, podemos relacionar estas magnitudes y conociendo los valores de algunas de ellas podemos determinar los valores de las otras, usando las fórmulas indicadas.

Cabe destacar que cuanto mayor sea la frecuencia, más corta será la longitud de onda; o inversamente, cuanto menor sea la frecuencia más larga será la longitud de onda. Esto es importante al seleccionar las medidas adecuadas de control del ruido. (Miki;Burgess, 2009).

A continuación, se muestra la relación entre la longitud de onda y la frecuencia.

Tabla N°2. Longitud de onda en el aire en condiciones atmosféricas estándares

Tipo de sonido	Tipo de frecuencia
100 Hz	3,44 m
1000 Hz	0,34 m
1,000 Hz	34,4 mm
10,000 Hz	3,4 mm

Fuente: Claudia Mannix S, base en el texto de Ken Mikl y Marion Burgess, 2009. Manual del estudiante, pág 16

f. Presión Acústica y Nivel de presión Acústica

También se puede llamar presión sonora, es la variación de presión del sonido; este valor se puede medir en unidades de presión: pascales.

En primer lugar tenemos la presión atmosférica, es decir la presión del aire ambiental en ausencia de sonido. Se mide en una unidad SI (Sistema Internacional) denominada Pascal (1 Pascal es igual a una fuerza de 1 newton actuando sobre una superficie de 1 metro cuadrado, y se abrevia 1 Pa). Esta presión es de alrededor de 100.000 Pa (el valor normalizado es de 101.325 Pa). Podemos luego definir la presión sonora como la diferencia entre la presión instantánea debida al sonido y la presión atmosférica, y, naturalmente, también se mide en Pa. Sin embargo, la presión sonora tiene en general valores muchísimo menores que el correspondiente a la presión atmosférica. Por ejemplo, los sonidos más intensos que pueden soportarse sin experimentar un dolor auditivo agudo corresponden a unos 20 Pa, mientras que los apenas audibles están cerca de 20 mPa (mPa es la abreviatura de micropascal, es decir una millonésima parte de un pascal). (Miyara, s.f).

Esta situación es muy similar a las pequeñas ondulaciones que se forman sobre la superficie de una profunda piscina. Otra diferencia importante es que la presión atmosférica cambia muy lentamente, mientras que la presión sonora lo hace muy rápido, alternando entre valores positivos (presión instantánea mayor que la atmosférica) y negativos (presión instantánea menor que la atmosférica) a razón de entre 20 y 20.000 veces por segundo. Esta magnitud se denomina frecuencia y se expresa en ciclos por segundo

o hertz (Hz). Para reducir la cantidad de dígitos, las frecuencias mayores que 1.000 Hz se expresan habitualmente en kilohertz (kHz). (Miyara, s.f).

- **Nivel de Presión Sonora**

El hecho de que la relación entre la presión sonora del sonido más intenso (cuando la sensación de sonido pasa a ser de dolor auditivo) y la del sonido más débil sea de alrededor de 1.000.000 ha llevado a adoptar una escala comprimida denominada escala logarítmica. (Miyara, s.f). Llamando **Pref** (presión de referencia a la presión de un tono apenas audible (es decir 20 mPa) y **P** a la presión sonora, podemos definir el **nivel de presión sonora (NPS) Lp** como

$$L_p = 20 \log (P / Pref)$$

Donde:

Log significa el logaritmo decimal (en base 10).

La unidad utilizada para expresar el nivel de presión sonora es el **decibel**, abreviado **dB**.

El nivel de presión sonora de los sonidos audibles varía entre 0 dB y 120 dB. Los sonidos de más de 120 dB pueden causar daños auditivos inmediatos e irreversibles, además de ser bastante dolorosos para la mayoría de las personas.

Nivel Sonoro con Ponderación A

El nivel de presión sonora tiene la ventaja de ser una medida objetiva y bastante cómoda de la intensidad del sonido, pero tiene la desventaja de que está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe. Esto se debe a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia. En efecto, mientras que un sonido de 1 kHz y 0 dB ya es audible, es necesario llegar a los 37 dB para poder escuchar un tono de 100 Hz, y lo mismo es válido para sonidos de más de 16 kHz. (Miyara, s.f).

Cuando esta dependencia de la frecuencia de la sensación de sonoridad fue descubierta y medida por Fletcher y Munson, en 1933, se pensaba que utilizando una red de **filtrado** (o **ponderación de frecuencia**) adecuada sería posible medir esa sensación en forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas. En otras palabras, tendría que intercalar unos

controles de graves y agudos al mínimo antes de realizar la medición. (Miyara, s.f).

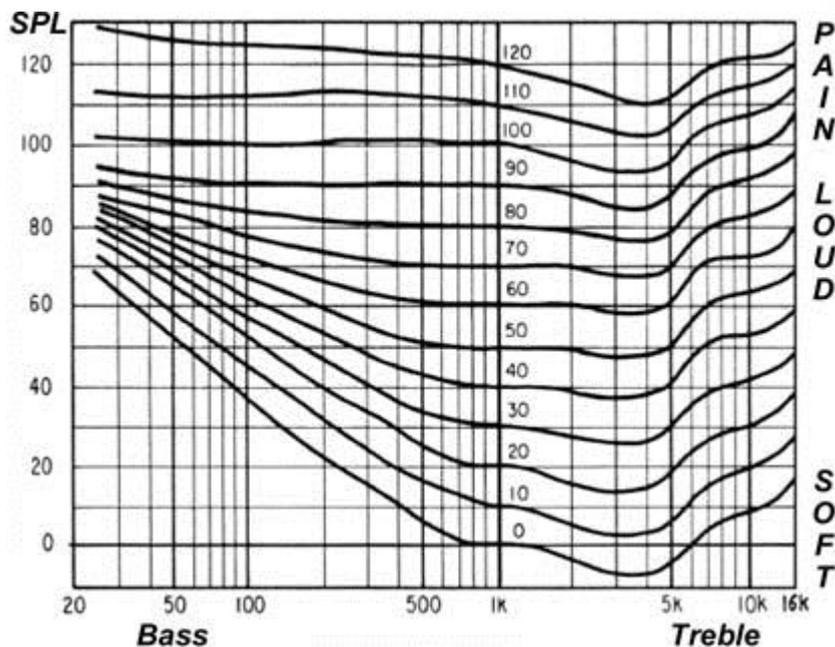


Imagen N°8. Fletcher y Munson, 1933 Las curvas isofónicas

Estas curvas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad (en decibelios) de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de fuertes por el oído, con lo que todos los puntos sobre una misma curva isofónica tienen la misma sonoridad.

Por supuesto, para completar una medición era necesaria una suerte de recursividad. Primero había que obtener un valor aproximado para decidir cuál de las tres redes había que utilizar, y luego realizar la medición con la ponderación adecuada. (Miyara, s.f).

La segunda dificultad importante proviene del hecho de que las curvas de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO, Organización Internacional de Normalización) son sólo promedios estadísticos, con una desviación estándar (una medida de la dispersión estadística) bastante grande. Esto significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones no a individuos específicos. Más aún, son aplicables a poblaciones jóvenes y otológicamente normales, ya que las mediciones se realizaron con personas de dichas características. (Miyara, s.f).

La tercera dificultad tiene que ver con el hecho de que las curvas de Fletcher y Munson fueron obtenidas para tonos puros, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la Naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, la música o la palabra, contienen muchas frecuencias simultáneamente. Esta ha sido tal vez la razón principal por la cual la intención original detrás de las ponderaciones A, B y C fue un fracaso. (Miyara, s.f).

Estudios posteriores mostraron que el nivel de sonoridad, es decir la magnitud expresada en una unidad llamada fon que corresponde al nivel de presión sonora (en decibeles sin ponderación) de un tono de 1 kHz igualmente sonoro, no constituía una auténtica escala. Por ejemplo, un sonido de 80 fon no es el doble de sonoro que uno de 40 fon. Se creó así una nueva unidad, el son, que podía medirse usando un analizador de espectro (instrumento de medición capaz de separar y medir las frecuencias que componen un sonido o ruido) y algunos cálculos ulteriores. Esta escala, denominada simplemente como sonoridad, está mejor correlacionada con la sensación subjetiva de sonoridad, y por ello la ISO normalizó el procedimiento (en realidad dos procedimientos diferentes según los datos disponibles) bajo la Norma Internacional ISO 532. En la actualidad existen inclusive instrumentos capaces de realizar automáticamente la medición y los cálculos requeridos para entregar en forma directa la medida de la sonoridad en son. (Miyara, s.f).

Tabla N°3. Ponderaciones de frecuencia

Ponderaciones de frecuencia	Caracterización
A	Es la red de ponderación más comúnmente utilizada para la valoración de daño auditivo e inteligibilidad de la palabra. Empleada inicialmente para analizar sonidos de baja intensidad, es hoy, prácticamente, la referencia que utilizan las leyes y reglamentos contra el ruido producido a cualquier nivel.
B	Fue creada para modelar la respuesta del oído humano a intensidades medias. Sin embargo, en la actualidad es muy poco empleada. De hecho una gran cantidad de sonómetros ya no la contemplan.

- C** En sus orígenes se creó para modelar la respuesta del oído ante sonidos de gran intensidad. En la actualidad, ha ganado prominencia en la evaluación de ruidos en la comunidad, así como en la evaluación de sonidos de baja frecuencia en la banda de frecuencias audibles.
- D** Esta red de compensación tiene su utilidad en el análisis del ruido provocado por los aviones.
- U** Es una red de ponderación de las más recientes. Se aplica para medir sonidos audibles en presencia de ultrasonidos.
- Fuente: PROCAME, 2007

4.2 Características o cualidades del sonido

Las cualidades del sonido son:

- El **tono** viene determinado por la frecuencia fundamental de las ondas sonoras y es lo que permite distinguir entre sonidos graves, agudos o medios. El tono lo determina la longitud de la onda, medida en ciclos por segundos o Hercios (Hz). Para que podamos percibir los humanos un sonido, éste debe estar comprendido en la franja de 20 y 20.000 Hz. Por debajo tenemos los infrasonidos y por encima los ultrasonidos. A esto se le denomina rango de frecuencia audible. Cuanta más edad se tiene, este rango va reduciéndose tanto en graves como en agudos.
- La **intensidad** es la cantidad de energía acústica que contiene un sonido. La intensidad viene determinada por la potencia acústica, que a su vez está determinada por la amplitud y nos permite distinguir si el sonido es fuerte o débil. Los sonidos que percibimos deben superar el umbral auditivo (0 dB) y no llegar al umbral de dolor (140 dB). Esta cualidad la medimos con el sonómetro y los resultados se expresan en decibelios (dB).
- El **timbre** es la cualidad que confiere al sonido los armónicos que acompañan a la frecuencia fundamental. Esta cualidad es la que permite distinguir dos sonidos, por ejemplo, entre la misma nota (tono) con igual intensidad producida por dos instrumentos musicales distintos.

- La **duración**. Esta cualidad está relacionada con el tiempo de vibración del objeto. Por ejemplo, podemos escuchar sonidos largos, cortos, muy cortos, etc.

4.3 Unidad de medida

La unidad que se utiliza para la medición del ruido y que permite estimar el sonido se conoce como **decibel** (decibelio, dB lineales).

El decibel es la décima parte del Bel, el cual es un logaritmo en base 10 de la relación de dos potencias o intensidades. Como esta unidad es muy grande, se usa la décima parte del Bel, el cual es el decibelio.

El decibel está determinado por la intensidad del sonido, es decir, depende de la presión de la vibración y de la alteración que esta produce en el aire. (MAAM, 2011).

En acústica la mayoría de las veces el decibelio se utiliza para comparar la presión sonora, en el aire, con una presión de referencia. Este nivel de referencia tomado en acústica, es una aproximación al nivel de presión mínimo que hace que nuestro oído sea capaz de percibirlo. El nivel de referencia varía lógicamente según el tipo de medida que estemos realizando. No es el mismo nivel de referencia para la presión acústica, que para la intensidad acústica o para la potencia acústica.

La razón por la que se utiliza el decibelio es que si no, tendríamos que estar manejando números o muy pequeños o excesivamente grandes, llenos de ceros, con lo que la posibilidad de error sería muy grande al hacer cálculos. Además también hay que tener en cuenta que el comportamiento del oído humano está más cerca de una función logarítmica que de una lineal, ya que no percibe la misma variación de nivel en las diferentes escalas de nivel, ni en las diferentes bandas de frecuencias.

4.4 Ejercicios

Selección única. Marque con una "x"

- Las características del ruido son:
 - Intensidad, tono y timbre
 - Presión y altura
 - Frecuencia, potencia y nivel
- Investigue, el doble de un nivel de ruido dado, es éste ruido aumentado en:
 - 6 dBA
 - 3 dBA
 - El número de dBA por dos (2)
- La escala de ponderación fisiológica más conocida es la de:
 - Ponderación A
 - Ponderación C
 - Ponderación Z
- Investigue, el proceso mediante el cual se eleva el umbral de audición para un sonido mediante la presencia de otro sonido, se conoce como:
 - Factor cresta
 - Ultrasonido
 - Enmascaramiento
- El tono de un ruido ó sonido está determinado por:
 - Intensidad del ruido
 - Frecuencia
 - propagación de onda sonora
- ¿El sonido es un fenómeno físico?
 - No
 - Si
 - Depende del medio
- La longitud de una onda se puede determinar si se conoce
 - sólo su amplitud.
 - su frecuencia y período.
 - su frecuencia y amplitud.
 - su rapidez de propagación y frecuencia.

5 PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Las ondas sonoras son longitudinales, mecánicas (no viajan en el vacío) y se propagan en todas las direcciones, de modo que **frente de ondas es esférico**; así mismo, tiene la capacidad de estimular el oído humano y producir sensación sonora. Por ello, el estudio del sonido debe tratarse de diferente forma los aspectos físicos y los aspectos fisiológicos relacionados con la audición. (Fisic, s.f.).

Los frentes de onda en una onda sonora son esféricos, pero podemos pensarlo en una dimensión como las ondas que se propagan a lo largo de un resorte como consecuencia de la comprensión longitudinal. Por lo que las partículas del medio se comprimen en las zonas de máxima amplitud de la ondulación y se separan en las de mínima amplitud. Estas zonas se denominan **compresión** y **rarefacción**. (Fisic, s.f.).

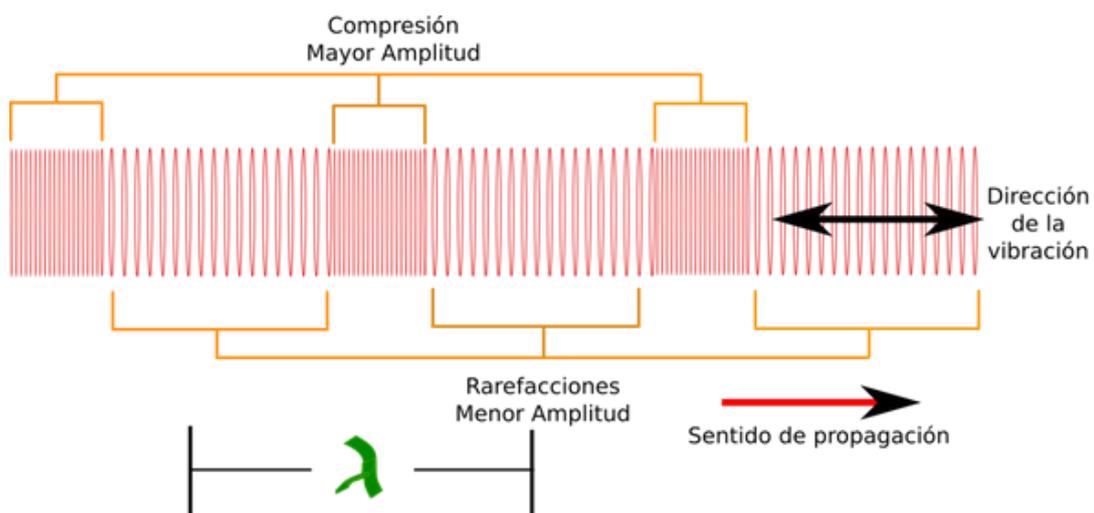
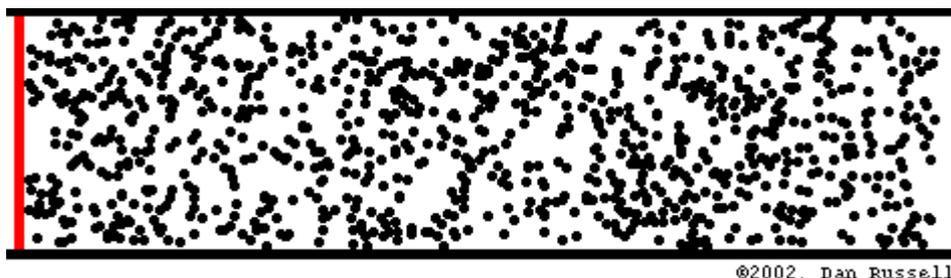


Imagen N°9. Propagación del sonido, tomado de Fisic, s.f.

5.1 Propagación

El sonido consiste en la propagación de una perturbación en un medio (en general el aire) ¿Cómo es la energía sonora? ¿Cómo se propaga la energía de un lugar a otro?

Para comprender mejor esto imaginemos un tubo muy largo lleno de aire. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas. Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo (o más técnicamente, en equilibrio). Este equilibrio es dinámico ya que las moléculas se mueven en todas direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente distribuidas (en cada cm^3 de aire hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas - 25 trillones). (Eumus, 2013).



©2002, Dan Russell

Imagen N°10. Propagación del sonido, tomado de Eumus, 2013

Supongamos que se mueve rápidamente el pistón hacia el interior del tubo. Las moléculas que se encuentran junto al pistón serán empujadas, mientras que las que se encuentran alejadas no. En la zona del pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir que la misma cantidad de aire ocupa menos espacio. El aire comprimido tiende a descomprimirse (como cuando abrimos la válvula de un neumático) desplazándose hacia la derecha y comprimiendo el aire próximo. Esta nueva compresión implica nuevamente una tendencia a descomprimirse, por lo que la perturbación original se **propaga** a lo largo del tubo alejándose de la fuente. (Eumus, 2013).

Es importante enfatizar que el aire no se mueve de un lugar a otro junto con el sonido. Hay transmisión de energía pero no traslado de materia.

5.1.1 Características del medio

Para que la onda sonora se propague en un medio este debe ser elástico, tener masa e inercia. El aire posee además algunas características relevantes para la propagación del sonido (Eumus, 2013):

- La propagación es **lineal** (en el intervalo de sonidos audibles la aproximación es válida). Esto permite que diferentes ondas sonoras se propaguen por el mismo espacio al mismo tiempo sin afectarse.
- El medio es **no dispersivo**. Por esta razón las ondas se propagan a la misma velocidad independientemente de su frecuencia o amplitud.
- El medio es **homogéneo**. No existen direcciones de propagación privilegiadas por lo que el sonido se propaga esféricamente (en todas direcciones).

5.2 compresión y rarefacción

Las regiones densas en las que gran número de moléculas se agrupan acercándose mucho entre sí se llaman **compresiones**. Una compresión corresponde a una región de alta presión.

Las regiones que tienen relativamente pocas moléculas se conocen como **rarefacciones** y corresponden a zonas de baja presión. Las compresiones y rarefacciones se alternan a través del medio en la misma forma que las partículas de aire individuales oscilan de un lado a otro en la dirección de la propagación de la onda.

5.3 Ondas de sonido

Las ondas mecánicas son las que se propagan a través de un material (sólido, líquido, gaseoso). La velocidad de propagación depende de las propiedades elásticas e inerciales del medio. Hay dos tipos básicos de ondas mecánicas: transversales y longitudinales. (Eumus, 2013).

En las ondas longitudinales el desplazamiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación, mientras que en las ondas transversales es perpendicular. (Eumus, 2013).

Las ondas sonoras son longitudinales. En muchos instrumentos (como en la vibración de una cuerda) podemos identificar ondas transversales (así como en la membrana basilar dentro de la cóclea, en el oído interno). (Eumus, 2013).

5.4 Excitación periódica

La mayoría de los sonidos de la naturaleza no son producto de una única perturbación del aire, sino de múltiples perturbaciones sucesivas. Un ejemplo de esto es la excitación producida por un diapasón luego de ser golpeado, analizada la clase pasada. (Eumus, 2013).

Consideremos un movimiento periódico del pistón. Sucesión de **compresiones** y **rarefacciones** del aire cerca del pistón genera una onda periódica que se propaga alejándose de la fuente. Luego de que la primera perturbación recorrió cierta distancia comienza la segunda, y así sucesivamente. La **longitud de onda** es la distancia entre perturbaciones sucesivas en el espacio. La **frecuencia** es la cantidad de perturbaciones por segundo (en ciclos por segundo o Hz). (Eumus, 2013).

Como ya mencionamos, al aire libre, las ondas sonoras se propagan en todas direcciones, como ondas esféricas. En presencia de superficies reflectoras la onda deja de ser esférica para volverse sumamente compleja debido a la superposición con las reflexiones. Se denomina **campo sonoro** a la forma en que se distribuye el sonido en diversos puntos dentro de un determinado espacio como una sala o al aire libre. (Eumus, 2013).

Se denomina **frente de onda** al conjunto de puntos de la onda sonora que se encuentran en fase, o de otra forma, una superficie continua que es alcanzada por la perturbación en un instante. Dentro del tubo el frente de onda es plano, mientras que en el monopolo al aire libre el frente de onda es esférico. A determinada distancia las ondas esféricas pueden considerarse ondas planas. (Eumus, 2013).

5.5 Presión sonora

Según lo visto hasta el momento, el sonido puede considerarse como una sucesión de ondas de compresión y rarefacción que se propaga por el aire.

Sin embargo si nos ubicamos en un punto en el espacio (una posición fija) veremos como la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente a medida que tienen lugar las sucesivas perturbaciones. (Eumus, 2013).

La presión atmosférica se mide en Pascal y es del orden de los 100.000 Pa (o como en los informes meteorológicos de 100 hPa). Sin embargo, cambios de presión debidos al pasaje de una onda sonora son muy pequeños respecto a este valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben implican un incremento de 20 Pa. Por esta razón, para distinguir el incremento de presión de la presión atmosférica en ausencia de sonido se lo denomina **presión sonora** (p). La presión sonora es la presión que se debe agregar a la presión atmosférica para obtener el valor real de presión atmosférica en presencia de sonido. (Eumus, 2013).

Las presiones sonoras audibles varían entre los 20 micro Pa y los 20 Pa (esto se verá mejor en otras clases). Es importante apreciar que es un rango muy importante de variación (de un millón de veces). Esta gran cantidad de cifras es incómoda de manejar. Es por esta razón y por razones fisiológicas que normalmente se expresa la presión sonora en decibels y se denomina **Nivel de Presión Sonora** (NPS o SPL por sus iniciales en inglés). Se define un nivel de presión sonora de referencia, que es aproximadamente la mínima presión audible (20 micro Pa). Se define el Nivel de Presión Sonora como (Eumus, 2013).:

$$NPS(dB) = 20 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

$$NPS_{ref} = 20 \log \left(\frac{P_{ref}}{P_{ref}} \right) = 20 \log(1) = 0$$

$$NPS_{max} = 20 \log \left(\frac{P_{max}}{P_{ref}} \right) = 20 \log(10^6) = 120$$

El nivel de referencia corresponde a 0dB mientras que el nivel sonoro máximo corresponde a 120dB. El rango de audición es entonces de 120dB.

Una sala de	30
conciertos vacía	dB

Conversación	40
susurrando	dB

Dispersión de potencia - pérdida proporcional al cuadrado de la distancia

5.6 Representación de una onda sonora

Según la naturaleza del sonido que hemos analizado, su representación en un oscilograma es para un punto espacial, el valor de presión sonora en cada instante de tiempo. Es decir, que la representación más usual de la onda sonora es como la variación de presión sonora en el tiempo. (Hacer diagrama en el pizarrón relacionando la distribución de moléculas y presión en el tubo con la representación del sonido como onda senoidal). (Eumus, 2013).

Esta variación de presión sonora puede traducirse a la variación de otra magnitud. Por ejemplo un micrófono es un transductor de variación de presión sonora a variación de una magnitud eléctrica (voltaje o corriente). (Eumus, 2013).

5.7 Velocidad, longitud de onda y frecuencia de una onda sonora.

¿De qué forma se relacionan la longitud de onda y la frecuencia de una onda sonora? A mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa. Para ver de qué forma se relacionan consideremos una onda periódica desplazándose hacia la derecha. El tiempo entre el instante que una cresta pasa por un punto espacial dado y el instante en que llega la próxima es el período T ($T=1/f$). La distancia que recorre la onda de un instante a otro corresponde a la longitud de onda L , por lo que la relación es: $L/T = Lf = c$, donde c es la velocidad del sonido. (Eumus, 2013).

Como ya mencionamos la velocidad de propagación del sonido no depende de la frecuencia ni de la intensidad del mismo sino de las características del medio. En el aire su velocidad es de aproximadamente 344 m/s @ 20C (o 1200 km/h - 3 segundos para recorrer 1 km). Esta velocidad aumenta con la temperatura (0.17% /grado C), pero no cambia con la presión. En los líquidos es un poco mayor (1440 m/s en el agua) y mayor aún en los sólidos (5000 m/s en el acero). (Eumus, 2013).

No debemos confundir la velocidad de propagación de la onda sonora con la velocidad instantánea de las partículas (estas realizan un movimiento oscilatorio más rápido). (Eumus, 2013).

Podemos apreciar que la velocidad del sonido es relativamente alta y normalmente la propagación parece instantánea. Sin embargo en algunos casos es notoria, por ejemplo al compararla con la velocidad de la luz. Ejemplos: ver una banda tocando en la plaza desde lo alto de un edificio, relámpago y trueno, eco, sistema de amplificación. (Eumus, 2013).

El rango de frecuencias audibles se considera de forma muy aproximada entre los 20 Hz y 20 kHz. Esto determina cierto rango de valores de longitud de onda del sonido que va desde los 1,7 cm a 17m. Las longitudes de onda son comparables a los objetos ordinarios de la vida cotidiana. Esto es determinante en la forma en que se propaga el sonido. (Eumus, 2013).

La longitud de onda juega un papel importante en las dimensiones de los altavoces. Cuando la longitud de onda emitida por un parlante es mucho menor que su propio tamaño la potencia emitida se reduce considerablemente. (Eumus, 2013).

5.8 Difracción

Las ondas luminosas poseen una longitud de onda muy pequeña (de 0,6 millonésimos de metros). Sabemos por experiencia que la luz se propaga en línea recta y arroja sombras bien definidas. Por otra parte, las olas del océano tienen una longitud de onda de varios metros. También sabemos que fluyen alrededor de un pilote que sobresalga del agua y son poco afectadas por el mismo. Estos ejemplos ilustran un hecho sumamente importante: las ondas son afectadas por objetos grandes comparados con su longitud de onda. Frente a objetos grandes las ondas arrojan sombras y parecen moverse en línea recta. Pero las ondas son poco afectadas por objetos pequeños comparados con su longitud de onda y pasan a través de tales objetos. (Eumus, 2013).

La longitud de onda de las ondas sonoras está a medio camino respecto a los objetos que nos rodean, por lo que en general muestran un **comportamiento mixto**. Las ondas graves (de longitud de onda grande) son capaces de eludir objetos ordinarios y por ejemplo dar vuelta

una esquina. Por el contrario los agudos tienden a propagarse en línea recta y arrojan sombras acústicas. Sabemos por experiencia que los graves de un parlante se dispersan en todas direcciones pero si salimos de la habitación donde está el parlante perdemos las notas agudas. (Eumus, 2013).

La difracción es de especial importancia en nuestra capacidad de localización del sonido (para sonidos agudos). La cabeza y las orejas arrojan sombras acústicas. (Eumus, 2013).

Otro ejemplo son los micrófonos que arrojan sombra sobre sí mismos para las frecuencias agudas y tiene una transferencia no completamente plana. (Eumus, 2013).

5.9 Reflexión

Cuando una onda sonora se refleja en un plano, parte de la energía se trasmite al obstáculo y otra parte es reflejada. Una de las formas de interferencia más usuales entre dos ondas sonoras es la que se produce entre una onda sonora proveniente de la fuente y una reflexión de la misma que viaja en la misma dirección. (Eumus, 2013).

Dos ondas de igual frecuencia viajando en sentidos opuestos forman un **patrón de onda estacionaria**. La onda resultante no se propaga, sino que oscila presentando puntos de amplitud mínima (nodos) y puntos de amplitud máxima (antinodos). En una cuerda vibrando puede distinguirse un patrón de onda estacionaria. (Eumus, 2013).

5.10 Pulsaciones

La superposición de ondas de frecuencia cercana produce un fenómeno particular denominado pulsación o batido. Si las frecuencias son muy cercanas el sistema auditivo no es capaz de discriminarlas y se percibe una frecuencia única promedio de las presentes ($\frac{1}{2} [f_1+f_2]$). La onda resultante cambia en amplitud a una frecuencia igual a la diferencia entre las frecuencias presentes (f_1-f_2). (Eumus, 2013).

Este fenómeno de batido se percibe para diferencias de frecuencia de hasta aproximadamente 15-20 Hz. Al aumentar la diferencia se comienza a

percibir un sonido áspero y al seguir aumentando llega un punto en que son percibidas como frecuencias diferentes. (Eumus, 2013).

5.11 Oscilaciones

Si un sistema recibe una única fuerza y comienza a oscilar hasta detenerse, el tipo de oscilación se denomina **oscilación libre**. Si nada perturbara el sistema este seguiría oscilando indefinidamente. En la naturaleza la fuerza de rozamiento (o fricción) amortigua el movimiento hasta que finalmente se detiene. Este tipo de oscilación se llama **oscilación amortiguada** y su amplitud varía exponencialmente decayendo con cierta constante de tiempo. (Eumus, 2013).

Si se continúa introduciendo energía al sistema podemos contrarrestar la amortiguación logrando una **oscilación autosostenida**. Esta oscilación se caracteriza por tener además de un ataque y un decaimiento, una fase intermedia casi estacionaria.

Una **oscilación forzada** puede producirse al aplicar una excitación periódica de frecuencia diferente a la frecuencia propia de oscilación del sistema, logrando que este vibre a la frecuencia de la excitación.

Se denomina **generador** al elemento que produce la excitación, y **resonador** al sistema que se pone en vibración. Este tipo de oscilación forzada es la que se produce en las cuerdas de una guitarra que vibran por "simpatía". No siempre es posible obtener una oscilación forzada, sino que depende de la relación entre las características del generador y el resonador. (Eumus, 2013).

En el caso de una oscilación forzada, cuando la frecuencia del generador coincide con la del resonador, se dice que el sistema está en resonancia. La magnitud de la oscilación del resonador depende de la magnitud de la excitación pero también de la relación entre las frecuencias de excitación y de resonancia. Cuanto mayor es la diferencia de frecuencias menor será la amplitud de la oscilación. Por el contrario cuando las frecuencias coinciden exactamente una pequeña cantidad de energía de excitación puede producir grandes amplitudes de vibración. (Eumus, 2013).

En un caso extremo el sistema resonador puede llegar a romperse, como cuando un cantante rompe una copa de cristal al dar una nota aguda.

Muchos instrumentos musicales tienen un elemento resonador que determina el timbre del instrumento favoreciendo algunos parciales de la excitación original. (Eumus, 2013).

5.12 Ejercicios

Selección única. Marque con una "x"

1. ¿Qué factor influye en la propagación del sonido?

- (I) Potencia
- (II) Densidad
- (III) Los kilowatios

Resuelva la siguiente sopa de letras:

- Propagación
- Compresión
- Rarefacción
- Onda de sonido
- Frente de onda
- NPS
- Difracción
- Pulsaciones
- Oscilaciones

P R O P A G A C I O N I F I C A E J D X
 N A V U D W L O N N O I S N E R P M O C
 V R L O C I D A D Q S E C R A L A R G T
 C E V X F K N E M I A M F W Y G N R F G
 Z F R E N T E D E S O N I D O L J M J F
 R A L N K W N O I O E H R L F C H B T D
 M C I B O N D A D E S O N I D O X S Q E
 A C P U T M A X F S N T F N S T B D I C
 G I J K L G S A N X C L Q D X U X B N N
 W O N X D I F R A C C I O N Y H D S P W
 M N I T W G N M R F R E C U E N C I S G
 P C N P P G O O O G F S S Y P Z O U I M
 I P U L S A C I O N E S H D J K K M S R

C D E W U K A E C V V E D U R E B L U V
 O S C I L A C I O N E S T N J J T R G Q
 Y M S I R D J F D M L K M X C D A E R O

6

EFECTO DOPPLER

Cuando una fuente de sonido se acerca o aleja de un observador, el tono del sonido percibido varía. Este fenómeno se conoce como efecto Doppler y fue explicado por primera vez en 1842 por el físico austriaco Christian Doppler (1803-1853). Físic, s.f.

Tomemos por ejemplo la sirena de una ambulancia. Cuando se acerca, las ondas sonoras que se propagan hacia delante están más apretadas, y llegan a nuestros oídos con más frecuencia y la sirena tiene un tono más agudo. Físic, s.f.

Cuando se aleja, las ondas que se propagan hacia atrás están más separadas, de frecuencia más baja y el sonido es más grave. Cuanto mayor es la velocidad de la fuente de sonido mayor es el cambio de frecuencia. Físic, s.f.

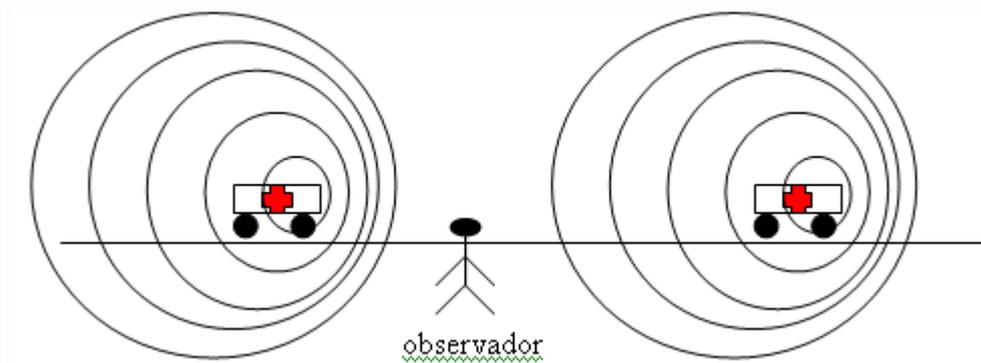


Imagen N°11. Efecto Doppler, tomado de Físic, s.f.

6.1 Ondas estacionarias

Cuando dos ondas de igual amplitud, longitud de onda y velocidad avanzan en sentido opuesto a través de un medio se forman **ondas estacionarias**. Por ejemplo, si se ata a una pared el extremo de una cuerda y se agita el otro extremo hacia arriba y hacia abajo, las ondas se reflejan en la pared y vuelven en sentido opuesto. Esta onda tiene la misma frecuencia y longitud de onda que la onda original. Con determinadas frecuencias las dos ondas, propagándose en sentidos contrarios interfieren para producir una onda estacionaria. Fisic, s.f.

Estas ondas están caracterizadas por la aparición de puntos en reposo (nodos) y puntos con amplitud vibratoria máxima (vientre). Esto es posible observarlo en las cuerdas vibrantes, como en las cuerdas de guitarra, y en los tubos sonoros. Fisic, s.f.

Las ondas estacionarias no son ondas viajeras sino los distintos modos de vibración de una cuerda, una membrana, aire en un tubo, etc.

6.2 Interferencia

Cuando dos o más movimientos ondulatorios alcanzan un mismo punto a la vez en el medio material por el que avanzan, se nos plantea el problema de saber qué tipo de perturbación se experimenta en ese punto como consecuencia de las dos ondas que inciden sobre él. En el caso de los fenómenos ondulatorios, a estos se le denomina **interferencia**, que es el resultado de dos o más ondas del mismo tipo en un mismo medio. (Fisic, s.f.).

Físicamente el principio de superposición se puede aplicar a pequeñas perturbaciones, en donde el efecto final es la suma de las elongaciones de cada una de las ondas por separado. (Fisic, s.f.).

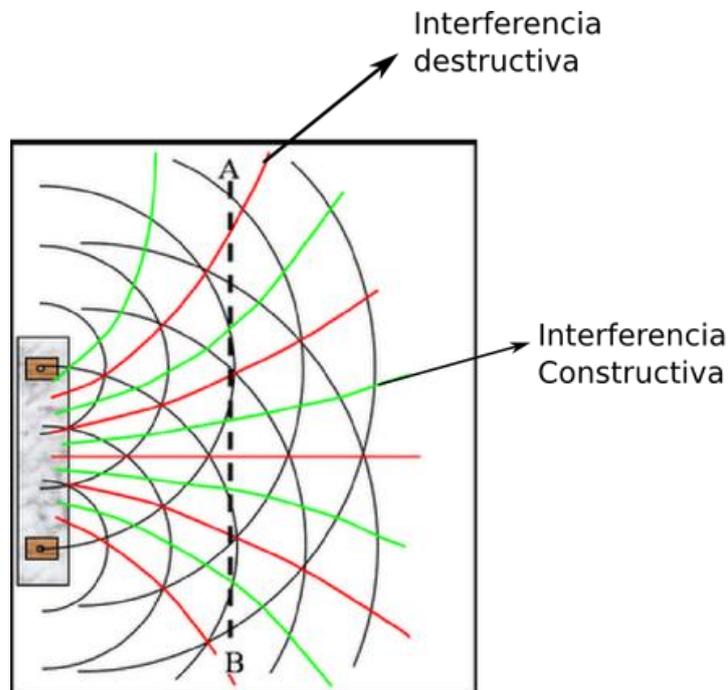


Imagen N° 12. Ondas Estacionarias, tomado de Fisic, s.f.

La interferencia en las ondas sonoras se produce cuando dos o más ondas sonoras coexisten en el mismo medio y al mismo tiempo, de modo que en cada punto del espacio se suman amplitudes o se restan. (Fisic, s.f.).

Un ejemplo común de interferencia en ondas sonoras lo comprobamos al estudiar lo que ocurre cuando golpeamos simultáneamente dos diapasones o cualquier otra fuente sonora de frecuencia levemente diferentes. El sonido que se produce varía de intensidad, y alterna entre sonidos fuertes y silencio virtual. Estas pulsaciones regulares se conocen como pulsaciones o batido. (Fisic, s.f.).

El resultado es una onda de amplitud modulada generada por la oscilación. Parece que las ondas sonoras se propagan sin afectarse unas a otras, incluso cuando su diferencia de intensidad es muy grande. Sin embargo, el sistema auditivo es sensible a la presión sonora total. Por lo tanto, es necesario analizar cómo se combinan o superponen diferentes ondas sonoras para encontrar la onda resultante de la superposición. Esta corresponde a la suma algebraica de cada una de las elongaciones que componen a la onda. (Fisic, s.f.).

6.2.1 Interferencia constructiva

La interferencia constructiva es la que nos proporciona un máximo, donde las dos amplitudes se suman, dando como resultado un pulso de mayor amplitud que los incidentes, pero que después cada uno sigue con su misma velocidad y dirección. (Fisic, s.f.).

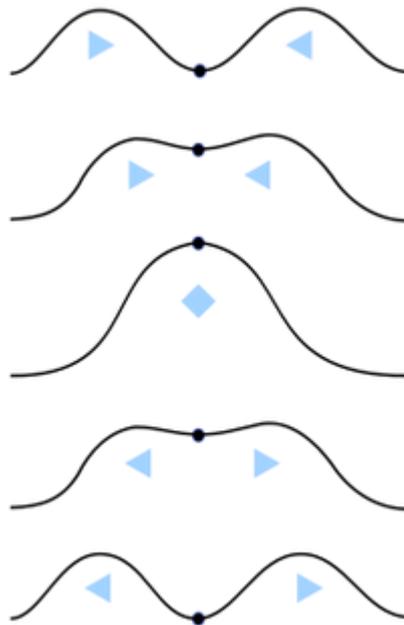


Imagen N° 13. Ondas Estacionarias, tomado de Fisic, s.f.

6.2.2 Interferencia destructiva

La interferencia destructiva se produce cuando una dos pulsos viajan en sentido contrario pero desfasados en 90° , o sea uno va por la parte superior del medio y el otro por la inferior, de manera que al interferir las amplitudes de ambos se restan, dando como resultado un pulso de menor amplitud, que en el caso de ser de igual amplitud los pulsos incidentes, se anula por completo. (Fisic, s.f.).

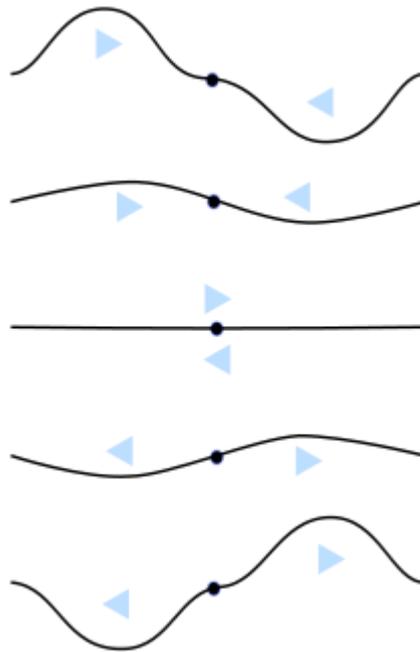


Imagen N° 14. Ondas Estacionarias, tomado de Fisic, s.f.

6.3 Cuerdas vibrantes

Una cuerda, tendida entre dos puntos fijos, es susceptible de emitir un sonido gracias a sus vibraciones. La nota producida por una cuerda vendrá determinada por la longitud (L), la tensión (T), la densidad (d) y la sección (S). Así, si disponemos de una cuerda muy tensa y fina, obtendremos una nota aguda; y por el contrario, si la cuerda está poco tensa y es gruesa, la nota será grave.

La frecuencia se puede encontrar a partir de la fórmula:

$$f = \frac{1}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{T}{d \cdot s}}$$

6.4 Resonancia

La frecuencia a la que un objeto vibra de manera natural se llama su frecuencia de resonancia, si un sonido que posea esa frecuencia se emite en las proximidades de un objeto, este capta la energía de la onda sonora y vibra de manera natural produciéndose la resonancia.

Cuando la música suena alta en una habitación, determinadas notas harán que resuene un objeto situado cerca de los parlantes. Una copa de cristal se puede romper si un cantante es capaz de emitir un sonido de frecuencia igual a la frecuencia natural de la copa.

En resumen, un cuerpo vibra por resonancia cuando llegan a él vibraciones de frecuencia igual a la propia vibración del cuerpo.

6.5 Infrasonido y Ultrasonido

No todas las ondas sonoras pueden ser percibidas por el oído humano, el cual es sensible únicamente a aquellas cuya frecuencia están comprendida entre los 20 y los 20.000 Hz, pudiendo variar de una persona a otra. A las perturbaciones de frecuencia inferior a los 20 Hz se les denomina infrasonidos y a las que la tienen rango superior a 20.000 Hz, ultrasonido. Tanto el infrasonido como el ultrasonido no son perceptibles por el oído humano.

- El **infrasonido** es el tipo de onda generada por grandes fuentes sonoras, como es el caso de los terremotos y volcanes, así como por maquinarias muy pesadas. Se ha comprobado que este tipo de onda puede provocar movimiento e irritación de los órganos internos del cuerpo.
- El **ultrasonido** tiene muchas aplicaciones en diferentes campos de la física, la química, la tecnología y la medicina.

Se utiliza a menudo en medicina porque, a diferencia de los rayos X, las ondas ultrasónicas no perjudican a los tejidos humanos. La ecografía se basa en la emisión de dichas ondas a través de la piel hacia los órganos en exploración, estos las reflejan y los ecos son recogidos por un escáner que forma en ellos una imagen sobre una pantalla.

El ultrasonido también es utilizado en la medición de profundidades marítimas, para localizar cardúmenes, con lo que resulta una excelente ayuda para la pesca, así como para detectar barcos hundidos y submarinos. Se le utiliza además en la industria para la detección de grietas en los metales, por medio de la diferencia en los ecos reflejados en la grieta.

Otro tipo de aplicación de las ondas ultrasonoras es la de matar microorganismos; al enfocar sobre ellos un haz ultrasónico, los hace entrar en rapidísima vibración, con lo cual mueren.

Existen animales capaces de emitir ondas ultra sonoras: Los delfines, por medio de fuertes chasquidos que rebotan en los objetos produciendo ecos, pueden localizar peces y otros objetos submarinos. Los murciélagos son capaces de viajar y detectar obstáculos por medio de las ondas ultrasónicas que son capaces de emitir y percibir.

6.5.1 Aplicaciones del ultrasonido

Entre las aplicaciones más importantes de los ultrasonidos se citan: los dispositivos de sonar (ecogoniómetro); los detectores de grietas en los materiales metálicos (opacos a las radiaciones electromagnéticas), que se basan en el hecho de que las grietas reflejan parcialmente la energía ultrasonora incidente; las "líneas de retardo" ultrasónicas (utilizadas en las calculadoras electrónicas), que se basan en el hecho de que la propagación de los ultrasonidos en los sólidos es de 100-1.000 m/seg, por lo tanto inferior a la velocidad de las ondas electromagnéticas ($3,10^8$ m/seg).

También se usan en la medida de propiedades elásticas de los sólidos y de materias plásticas artificiales (como altos polímeros); en el trabajo mecánico de materiales extremadamente duros, donde el utensilio se sustituye por una cabeza radiante ultrasónica con una pasta abrasiva intermedia; la producción de emulsiones entre dos líquidos de densidad diferente mediante las irradiaciones de la superficie de separación; la precipitación de partículas en suspensión en un gas por efecto de la coagulación de las mismas y que se produce por la acción de una intensa radiación ultrasonora.

Además, se aplican en ciertos procedimientos metalúrgicos, como el refinado de los granos cristalinos durante el enfriamiento de las coladas fundidas, la ventilación de metales fundidos mediante irradiación por ultrasonido y la soldadura del aluminio mediante la irradiación ultrasónica de las superficies que se van a soldar, para eliminar la capa superficial de óxido. Finalmente, se aplican también los ultrasonidos en bacteriología (destrucción de microorganismos) y en medicina (curación de enfermedades del oído, neuritis, periartrosis, artrosis y úlceras).

6.6 Ejercicios

1. Preguntas de desarrollo

a. En qué consiste el efecto doppler?

b.Cuál es la diferencia entre infrasonido y ultrasonido?

c. Cuáles son los tipos de interferencia?

2. Encuentre las siguientes palabras:

- Ondas estacionarias
- Efecto Doppler
- Infrasonido
- Ultrasonido
- Interferencia
- Cuerdas - vibrantes
- Resonancia

W O M D P W C I E N T I F I C A E J V C
 N H V U D W L O N G I T U D D E O N I U
 V E A I C N A N O S E R C R A L A R B E
 C I V X F K N E M I A M F W Y G N R R R
 Z M I I X I N F R A S O N I D O J M A D
 R W L N K W N O I O E H R L F C H B N A
 M P I B L Z D A E T Y P E R I O D O T S
 O N D A S E S T A C I O N A R I A S E C
 G E J K L G S A N X C L Q D X U X B S N
 W Z N X U C O P O V A V A X Y H D S T W
 M J I T W U N M R F R E C U E N C I A G
 P C N P U L T R A S O N I D O Z O U I M
 I R T A K V R M G M M J H D J K K M S R
 C E F E C T O D O P P L E R R E B L U V
 O T N J J T R G Q Z A X V Z C L O P J K

7

FENOMENOS ONDULATORIOS

7.1 Reflexión y refracción del sonido

Se comprueba que las ondas sonoras se reflejan en el mismo ángulo con el que inciden, pero se atenúa si la superficie es blanda o rugosa.

Se puede entender el mecanismo de la reflexión si se considera que las distintas presiones sonoras transportadas por la onda que inciden contra un material hacen que este vibre. Parte de la energía vibratoria se devuelve al medio material mediante la reflexión y la otra parte absorbida, a su vez, se transforma en otros dos tipos de energía: la que disipa en el medio y la que se transmite por el material. (Fisic, s.f.).

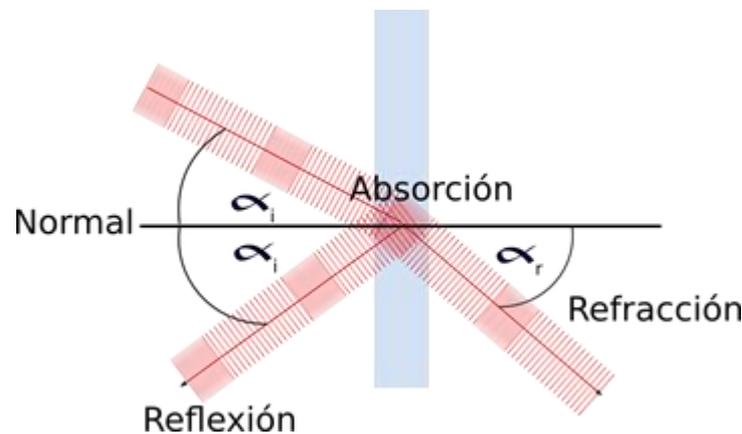


Imagen 15. Reflexión, tomado de Fisic, s.f.

La refracción es otra de las características de los movimientos ondulatorios. **Consiste en el cambio de dirección y de rapidez que sufre una onda cuando pasa de un medio a otro de distinta características.** Pero la refracción también puede producirse dentro de un mismo medio cuando las características de este no son perfectamente homogéneas, sino que varían en cuanto a su densidad o su temperatura y,

por consiguiente, la rapidez de propagación del sonido en el aire sufre refracciones, dada que la temperatura del aire no es uniforme. (Fisic, s.f.).

En un día soleado, las capas de aire próximas a la superficie terrestre están a mayor temperatura que las capas más altas, y por lo tanto, la rapidez del sonido aumenta con la temperatura porque las moléculas oscilan más rápidamente y transmiten al entorno la perturbación, por ello en las capas bajas la rapidez es mayor que en las altas. (Fisic, s.f.).

Caso contrario sucede en las noches, donde el aire próximo a la tierra se enfría más rápidamente que el de las capas inmediatamente superiores. De este modo, el sonido emitido desde el suelo se curva hacia abajo en las capas frías más altas. Por ello en la noche podemos escuchar con un mayor alcance. (Fisic, s.f.).



Imagen 16. Refracción del sonido en un mismo medio, tomado de Fisic, s.f.

7.2. Absorción y aislamiento acústico

La absorción del sonido es uno de los problemas fundamentales con que se enfrentan un ingeniero cuando desea aislar del ruido, un edificio o una zona determinada. (Fisic, s.f.).

Afortunadamente, los distintos materiales tienen la capacidad de absorber energía acústica según su porosidad. Basándose en esta propiedad, se decide qué materiales son más adecuados para revestir las paredes interiores de la una sala, por ejemplo. **Cuanto más poroso se un material, más**

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA

absorbente será y, por lo tanto, reflejará menos sonido. Si una habitación tiene las paredes lisas, cuando hay varias personas hablando dentro de ella habrá más ruido que si revestimos las mismas paredes con gruesas cortinas de tela. (Fisic, s.f.).

Para conseguir un buen aislamiento acústico, es necesario impedir que el sonido se transmita, para ello es necesario materiales duros, pesados y poco elásticos. Algunos ejemplos son hormigón, acero, plomo, etc. (Fisic, s.f.).

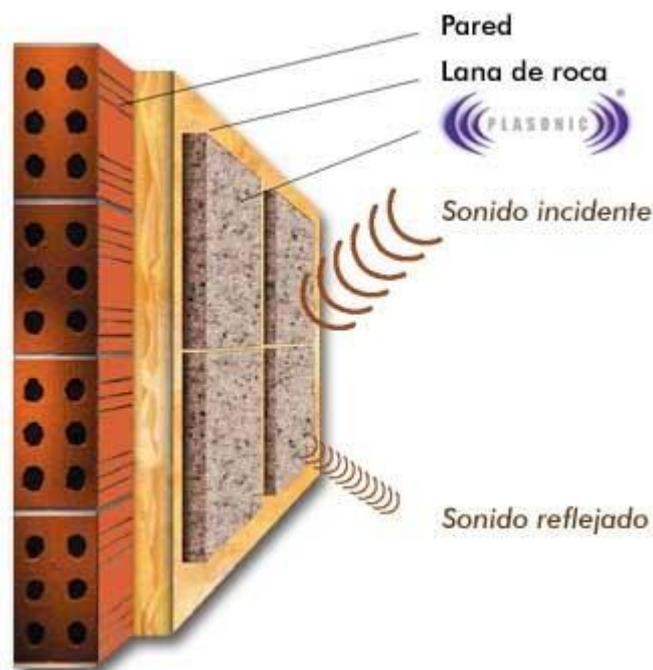


Imagen 17. Absorción y aislamiento acústico, tomado de Fisic, s.f.

7.3. Reverberación

Es la prolongación del sonido una vez que se ha extinguido la fuente sonora. Se produce por las múltiples ondas reflejadas que continúan llegando al oído. Si las paredes fueran reflectores perfectos, el proceso sería de duración infinita, afortunadamente, en las paredes se absorbe sonido y el proceso tiene una duración limitada. (Fisic, s.f.).

7.4. Eco

El eco es otro fenómeno relacionado con la reflexión del sonido. Se produce cuando el sonido inicial ya se ha extinguido y aparece un sonido igual de forma reflejada. (Fisic, s.f.).

Cuando la superficie reflectante está suficientemente lejos, nuestro oído puede percibir por separado la onda directa y la reflejada. Si la separación temporal entre ambos sonidos es superior a 0,1 (s), el sonido repetido se llama eco. Es decir, el oído puede percibir dos sonidos al menos. (Fisic, s.f.).

Si suponemos, por ejemplo, que la rapidez del sonido es de 340 m/s, entonces la distancia que recorre en 0,1 (s) es de 34 (m), pero como la onda debe ir y venir, entonces es de 17 (m). (Fisic, s.f.).

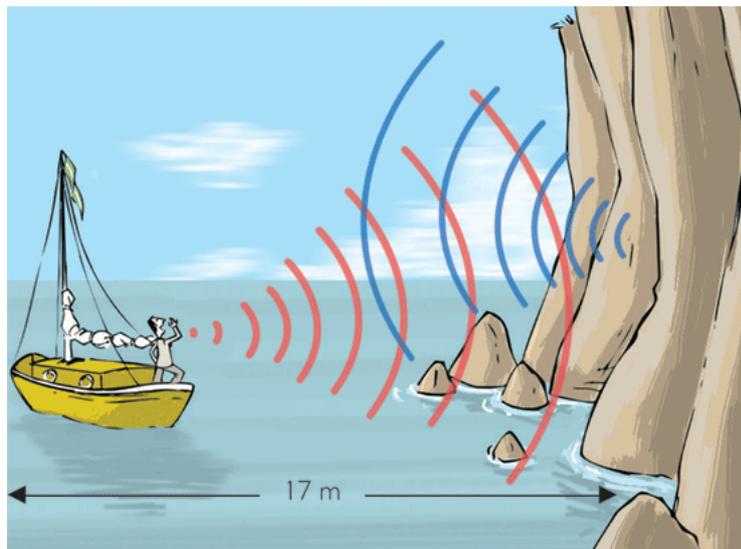


Imagen N°18. El sonido se refleja: el eco y la reverberación, tomado de Carmen, 2010.

7.5 Otros conceptos

7.5.1 Campo difuso

Cuando el sonido se propaga en un *campo no libre* de forma que las ondas sonoras se propagan en todas direcciones y que la *presión sonora* es igual en todos los puntos de ese recinto, se dice que el *campo acústico* es perfectamente *difuso*. (Martínez, s.f.)

7.5.2 Factor de directividad

Es la medida del grado en que la energía sonora se concentra en una determinada dirección del espacio. Se define como la relación existente entre la *presión sonora cuadrática media* existente a una distancia dada y en una dirección determinada, y la *presión sonora cuadrática media* en el mismo punto pero considerando la onda esférica. (Martínez, s.f.)

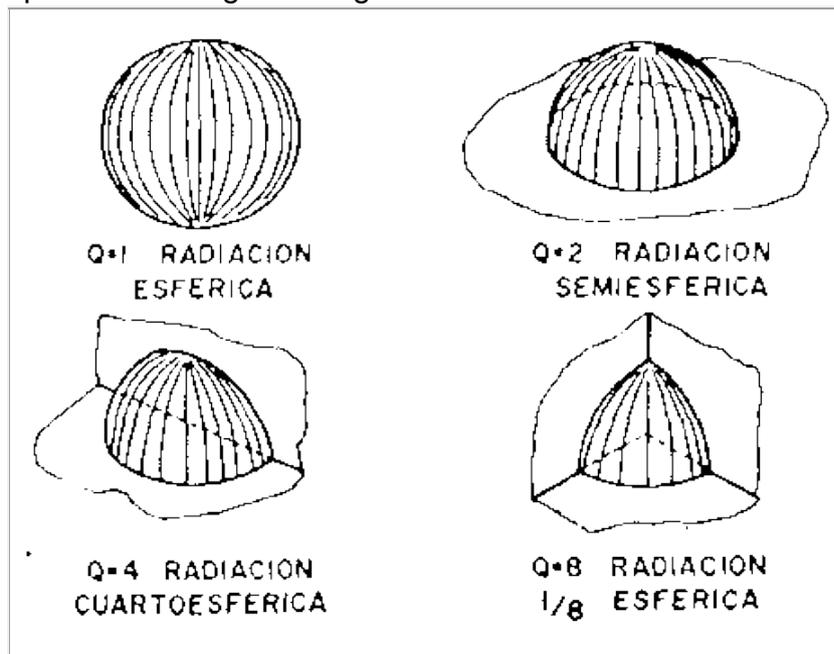
$$Q = \frac{P_d^2}{P_m^2}$$

Si la fuente sonora está suspendida en el espacio abierto, sin reflexiones, radiará su energía en todas las direcciones. Así, su directividad esférica es total y **Q=1**.

Si está en el suelo, todo el ruido se radiará a través de una semiesfera (sin considerar la energía absorbida por el suelo), con lo que la densidad de energía acústica será del doble, y **Q=2**.

Igualmente, si la fuente sonora está contra una pared, **Q=4**, y si está en una esquina será **Q=8**.

Esto se aprecia en la siguiente figura:



7.5.3 Impedancia acústica

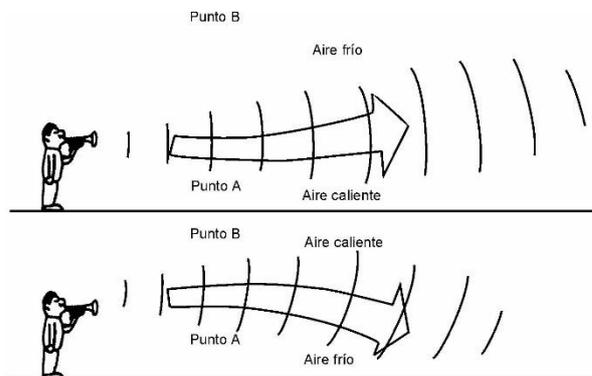
Cada medio (sólido, líquido o gaseoso) ofrece una resistencia más o menos grande para la propagación del sonido. Se dice que el medio posee una *impedancia acústica*. (Martínez, s.f.). Se define como el cociente entre la *presión acústica (P)* y la *velocidad del sonido (v)*: $Z = P/v$

7.6 Ejercicios

Selección única. Marque con una "x"

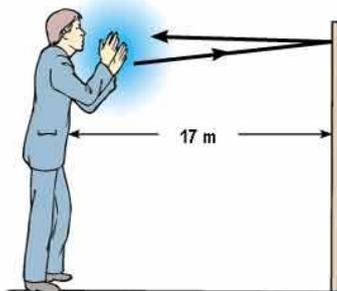
- Si el sonido se comporta como una onda, se espera que presente
 - reflexión solamente.
 - refracción solamente.
 - interferencia solamente.
 - reflexión y refracción solamente.
 - reflexión, refracción e interferencia.

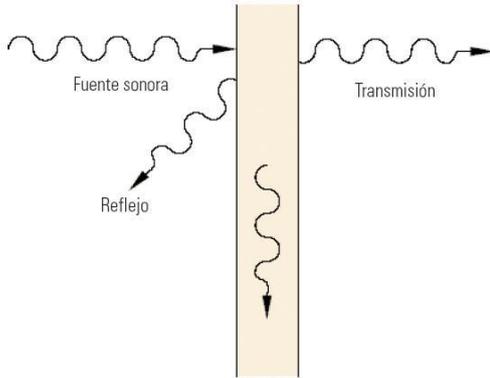
Clasifique las siguientes imágenes:



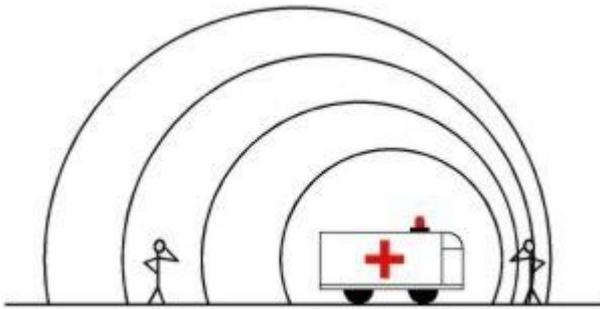
a.

b.



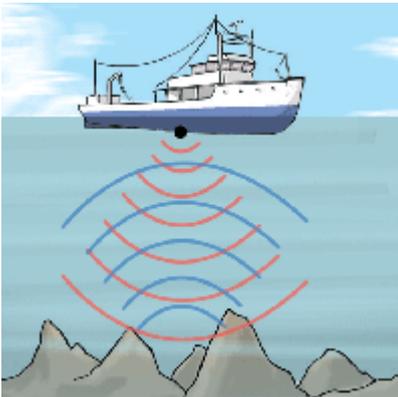
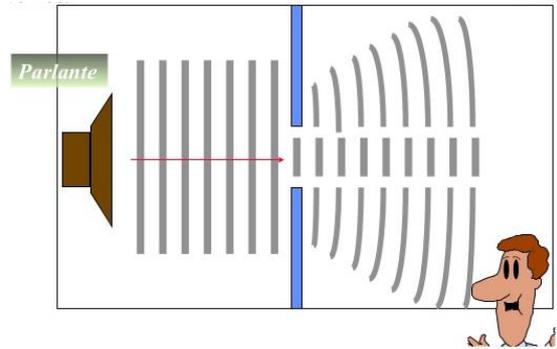


c.



d.

e.



f.

8

CONCEPTOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

DE NIVELES DE RUIDO

8.1 Espectro

El concepto de **espectro** es de importancia en Acústica. Cuando introducimos el concepto de frecuencia, dijimos que las ondas periódicas tienen asociada una frecuencia. Sin embargo, esto es sólo parte de la verdad, ya que por lo general dichas ondas contienen varias frecuencias a la vez. Esto se debe a un notable teorema matemático denominado Teorema de Fourier (en honor a su descubridor, el matemático francés Fourier), que afirma que cualquier forma de onda periódica puede descomponerse en una serie de ondas de una forma particular denominada **onda senoidal** (o **senoide**, o **sinusoide**), cada una de las cuales tiene una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de la onda original (**frecuencia fundamental**). (Miyara, S.f.)

Así, cuando escuchamos un sonido de 100 Hz, realmente estamos escuchando ondas senoidales de frecuencias 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, etc. Estas ondas senoidales se denominan **armónicos** del sonido original, y en muchos instrumentos musicales (como la guitarra) son claramente audibles. (Miyara, S.f.)

¿Qué sucede con un sonido original cuya forma de onda ya es senoidal? Cuando uno intenta aplicar el teorema de Fourier a una senoide, el resultado es que tiene *un solo armónico*, de la misma frecuencia que la senoide original, por supuesto. (Nótese que el Teorema de Fourier no dice que *todas* las formas de ondas deban tener *varios* armónicos, sino más bien que cualquier forma de onda puede obtenerse por superposición de cierta cantidad de senoides, cantidad que puede reducirse a una sola, que es lo que ocurre con las ondas senoidales.) El hecho de que cada onda senoidal

tiene una única frecuencia ha llevado a llamar también **tonos puros** a las ondas senoidales. (Miyara, S.f.)

La descripción de las ondas senoidales que componen un sonido dado se denomina espectro del **sonido**. El espectro es importante debido a varias razones. Primero porque permite una descripción de las ondas sonoras que está íntimamente vinculada con el efecto de diferentes dispositivos y modificadores físicos del sonido. En otras palabras, si se conoce el espectro de un sonido dado, es posible determinar cómo se verá afectado por las propiedades absorbentes de una alfombra, por ejemplo. No puede decirse lo mismo en el caso en que se conozca sólo la forma de onda. (Miyara, S.f.)

En segundo lugar, el espectro es importante porque la percepción auditiva del sonido es de naturaleza predominantemente espectral. En efecto, antes de llevar a cabo ningún otro procesamiento de la señal acústica, el oído descompone el sonido recibido en sus componentes frecuenciales, es decir en las ondas senoidales que, según el teorema de Fourier, conforman ese sonido. Por ese motivo, con algo de práctica es posible por ejemplo reconocer las notas de un acorde. (Miyara, S.f.)

¿Qué puede decirse del espectro de los sonidos aperiódicos? El teorema de Fourier puede extenderse al caso de sonidos aperiódicos. Éstos pueden ser tan simples como los sonidos de una campana o tan complejos como el así llamado **ruido blanco** (un ruido similar al que capta una emisora de FM en ausencia de señal o de portadora). En el primer caso, el espectro es discreto, vale decir un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas, aunque no serán ya múltiplos de ninguna frecuencia. Podemos tener, por ejemplo, 100 Hz, 143,3 Hz, 227,1 Hz, 631,02 Hz. En el segundo caso, tenemos ¡todas las frecuencias! Esto es lo que se denomina un espectro **continuo**. (Miyara, S.f.)

8.2 Banda octava

El ruido es un fenómeno ondulatorio que se transmite en nuestro caso, por el aire. Dependiendo de la frecuencia (variaciones por segundo) de la onda se obtiene lo que uno aprecia como distintos tonos. Es así que el oído tiene la capacidad de oír sonidos que van desde las frecuencias de 20 Hz (más graves) hasta frecuencias de 20000 Hz (más agudos). (Fornés, 2015). Como se aprecia en la siguiente imagen:



Imagen N°19. Ondas, tomado de Fornés, 2015

Debido a que el oído puede identificar rangos de frecuencias y no puede diferenciar entre una u otra frecuencia puntual que se encuentren muy cercanas, y a los efectos de simplificar los estudios, se agrupan intervalos de frecuencias en bandas de octavas de manera que se asimile a la respuesta del oído. En estas bandas, la frecuencia central es la que identifica cada rango. (Fornés, 2015).

Por ejemplo: Para el rango que va desde 710 Hz hasta 1410 Hz la frecuencia central es de 1000 Hz, y eso se denomina banda de octava de 1000 Hz. Tal como podemos observar en la figura a continuación tenemos bandas de octava de 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz, cada una de las cuales tiene su Nivel de presión sonora. (Fornés, 2015).

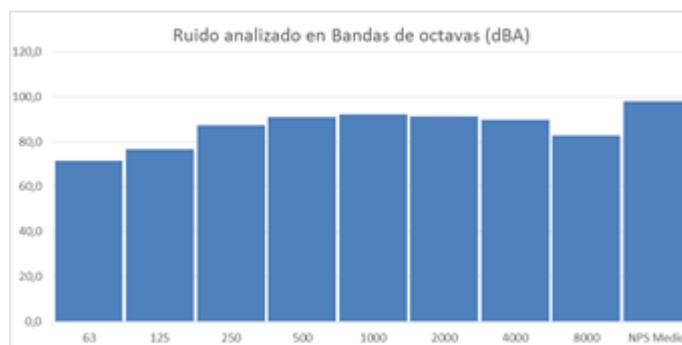


Imagen N°20. Bandas de octavas, tomado de Fornés, 2015

La razón principal de la necesidad de realizar un análisis en Banda de octava radica en que un instrumento simple integra todas las frecuencias como si fuese una sola y entrega el nivel de presión sonora total; si este valor final fuese inferior al límite legal no requeriría un análisis complementario adicional ya que las bandas de octavas por si solas nunca podrían superar este valor. Ahora en cambio, si el límite es superado toma mayor relevancia el análisis de banda de octava ya que es importante detectar cuáles son las

bandas que están generando estos niveles de presión elevados, ya que permite trabajar sobre ellos para reducirlos o para proteger adecuadamente al trabajador. La elección incorrecta de un protector auditivo sin el análisis por banda puede llevar a que el trabajador no esté siendo adecuadamente protegido. (Fornés, 2015).

8.3 Nivel de presión sonora

El Nivel de presión sonora (NPS o SPL) nos indica la intensidad que presenta ese sonido. Esta presión va desde 0,00002 (Pa) Pascales hasta valores superiores a los 20 Pascales (umbral de dolor). Dada que la escala es muy grande se la simplificó utilizando una escala logarítmica que va desde los 0 dB (0,00002 Pa) hasta valores superiores a los 120 dB (20 Pa). (Fornés, 2015).

Se expresa en decibeles (dB) y se define por la siguiente relación matemática:

$$\text{NPS} = 20 \text{ Log } (P/P_0)$$

En que P : valor eficaz de la presión sonora medida.

P₀: valor eficaz de la presión sonora de referencia, fijado en 2×10^{-5} [N/m²]

8.3.1 Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente (NPSeq)

Es aquel nivel de presión sonora constante, expresado en decibeles A, que en el mismo intervalo de tiempo, contiene la misma energía total (o dosis) que el ruido medido.

8.3.2 Nivel de Presión Sonora Máximo (NPSmax)

Es el máximo Nivel de Presión Sonora registrado durante un período de medición dado.

8.3.3 Nivel de Presión Sonora Mínimo (NPSmin)

Es el mínimo Nivel de Presión Sonora registrado durante un período de medición dado.

8.4 Curva de ponderación

Se crearon para intentar aproximar los aparatos que analizan acústicamente a la respuesta del oído (como por ejemplo el sonómetro).

Estas curvas nos dice que la respuesta del oído humano no es plana y varía con el nivel de presión sonora que escuchamos.

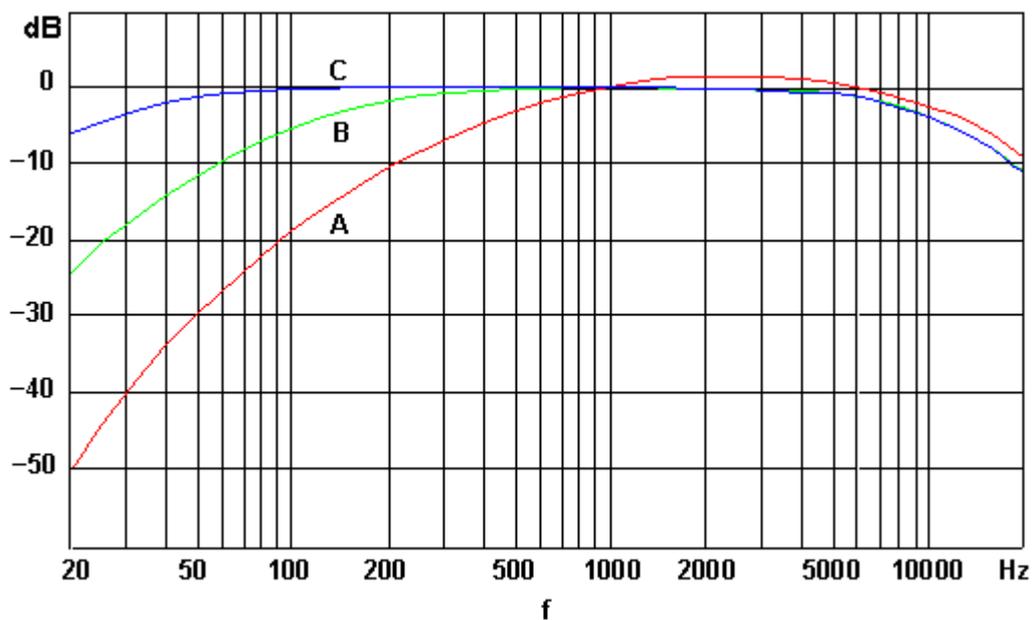


Imagen N°21. Curva de ponderación

- La curva de ponderación A es adecuada para niveles bajos de presión sonora, como por ejemplo la medida de ruidos de fondo.
- La curva de ponderación B es adecuada para niveles intermedios, pareciéndose a la curva A pero con menos reducción de niveles bajos, es buena para medida de niveles de escucha musical.
- La curva de ponderación C es muy parecida a la B y apenas aporta atenuación de las frecuencias graves.

8.5 Ejercicios

Selección única. Marque con una "x"

1. Las siguientes son frecuencias (Hz) utilizadas en mediciones de ruido en bandas de octava:

(I) 100, 200, 400, 800, 1600, 3200,
6400, 12800

(II) 125, 250, 500, 1000, 2000, 8000,
16.000

(III) 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400,
500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000,
2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000

2. Si a cada una de las bandas de octava registradas por el sonómetro, se resta el valor dado por la curva de atenuación y se le suma dos veces la desviación standard dada por el fabricante y éstos resultados se suman logarítmicamente el valor resultante corresponde a:

- (I) La atenuación generada por el ruido rosa del protector auditivo utilizado
- (II) La curva de atenuación corregida del protector auditivo
- (III) El nivel de ruido que recibe el trabajador utilizando dicho protector

9 SUMA DE NIVELES DE PRESIÓN ACÚSTICA EN DECIBELES

Debido a que la escala en dB es una escala logarítmica, no es posible sumar aritméticamente dos o más niveles de ruido expresados en dB .

Por ejemplo: dos máquinas que producen cada una, en un determinado punto, 85 dB , no producirán 170 dB cuando trabajen juntas, sino 88 dB .

Pueden utilizarse los siguientes procedimientos de suma en dB :

9.1 Analíticamente

Supongamos que tenemos dos fuentes de ruido que en un determinado punto producen L_{p1} y $L_{p2}\text{ Db}$ cada una. (Martínez, s.f.)

$$L_{p1} = 10 \log \left[\frac{P1_{rms}}{P_o} \right]^2$$

$$L_{p2} = 10 \log \left[\frac{P2_{rms}}{P_o} \right]^2$$

$$P1_{rms}^2 = P_o^2 \cdot 10^{\frac{L_{p1}}{10}}$$

$$P2_{rms}^2 = P_o^2 \cdot 10^{\frac{L_{p2}}{10}}$$

El nivel de presión acústica será:

$$L_T(dB) = 10 \log \left[\frac{P_T_{rms}}{P_o} \right]^2$$

$$L_T(dB) = 10 \log \left[10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right]$$

Si suponemos que tenemos n fuentes de ruido que en un punto producen L_1, L_2, \dots, L_n , la suma en dB es:

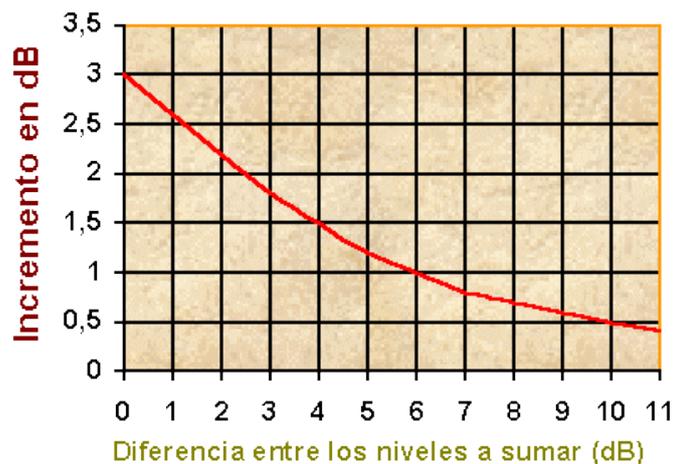
$$L_T(dB) = 10 \log \sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_i}{10}}$$

9.2 Gráficamente

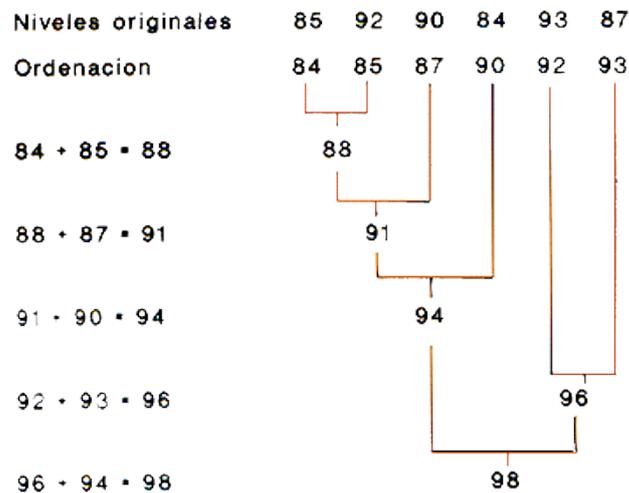
Es un método práctico aproximado muy útil puesto que no es preciso realizar cálculos logarítmicos. (Martínez, s.f.)

El método es el siguiente:

- Ordenar de mayor a menor los niveles de ruido a sumar.
- Restar el primero del segundo y la diferencia obtenida, llevarla al eje de abscisas del gráfico. En ordenadas se obtendrá el número de dB que se han de sumar al ruido de mayor nivel.
- Al nivel resultante de la suma anterior, se le resta el tercer valor y se opera de igual modo.
- Repetir el proceso hasta terminar con todos los niveles dados.

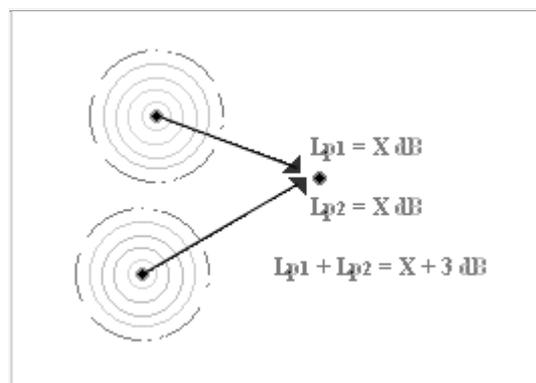


En la figura siguiente se indica un ejemplo de suma por este método, de 6 niveles de ruido cuyo valor suma final es de 98 dB .



Si dichos valores se hubiesen calculado por la fórmula exacta, hubiésemos llegado a $97,5 \text{ dB}$, es decir, la única diferencia es la producida por el redondeo. (Martínez, s.f.)

Es importante notar que cuando la diferencia entre los niveles en dB de dos ruidos es de 15 dB o superior, la cantidad a sumar al ruido mayor es tan pequeña ($<0.4 \text{ dB}$) que en la mayoría de los casos puede despreciarse, por lo que **la suma de dos ruidos que difieren en 15 o más dB, en la práctica, es igual al ruido mayor.** (Martínez, s.f.)



9.3 Resta de dB y ruido de fondo

Definamos previamente los conceptos de *ruido ambiente* y *ruido de fondo*.

- **Ruido Ambiente:** es el ruido total en un medio ambiente dado.

- **Ruido de fondo:** es el nivel de ruido ambiente sobre el que se deben presentar las señales o medir las fuentes de ruido.

En algunos casos es necesario restar niveles de ruido.

El caso más típico es cuando nosotros queremos medir el ruido de una máquina en particular en presencia de **ruido de fondo**. Entonces es importante saber si el ruido medido es debido al ruido de fondo, al ruido de la máquina o a una combinación de ambos. El procedimiento cuando queremos realizar este test es el siguiente (Martínez, s.f.)

1. Medir el ruido total existente, el de la máquina más el ruido de fondo, L_{S+N}
2. Detener la máquina y medir el ruido de fondo, L_N
3. Calcular la diferencia $DL=L_{S+N}-L_N$ y utilizar una curva similar a la utilizada para la suma de dB

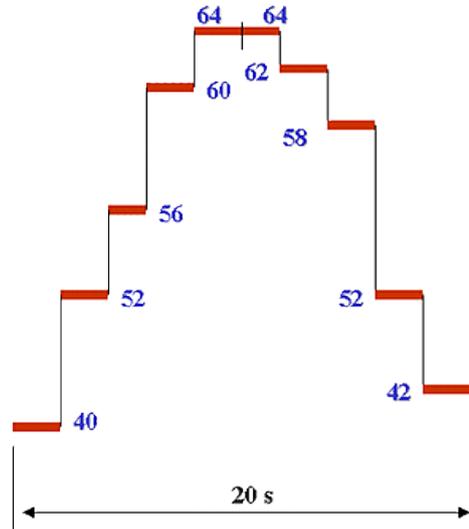
La resta de dB se puede hacer como la suma, por dos métodos; por cálculo y por un gráfico. Por cálculo es exactamente igual que la suma pero con los signos cambiados. (Martínez, s.f.)

Para el método gráfico tendremos en cuenta que si DL es menor que $3 dB$, el ruido de fondo es demasiado elevado para una medida precisa y el nivel de ruido correcto no puede hallarse mientras el ruido de fondo no se haya reducido. De otro modo, si la diferencia es superior a $10 dB$, el ruido de fondo puede ser ignorado. Si la diferencia está entre $3 dB$ y $10 dB$, el nivel de ruido correcto puede hallarse, entrando el valor de DL en el eje horizontal y leer el valor de corrección, en el eje vertical. El nivel correcto producido por la máquina, se hallará restando este nivel del valor L_{S+N} (Martínez, s.f.)

9.4 Nivel de ruido continuo equivalente

La gran mayoría de los ruidos existentes en el lugar de trabajo tienen niveles de presión acústica variables en el tiempo.

Supongamos que tuviésemos que evaluar un ruido cuyo gráfico de variación del nivel con el tiempo está indicado en la siguiente figura:



¿Qué valor deberíamos escoger para caracterizar el ruido?, ¿el valor medio?, ¿el valor mínimo?, ¿deberíamos hacer una distribución estadística especificando los porcentajes?

Lo ideal sería poder asignar al ruido variable un solo número que reflejará el nivel de un ruido constante que tuviese la misma energía que el ruido variable en el periodo de tiempo estudiado. (Martínez, s.f.)

Esto es precisamente lo que hace el **nivel de ruido continuo equivalente**, definido por la expresión:

$$L_{eq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 dt$$

Siendo:

$L_{eq,T}$ = Nivel de ruido continuo equivalente en *dB*.

$T = t_2 \times t_1$ = Tiempo de exposición.

$P(t)$ = Presión acústica instantánea en *Pa*.

Si conocemos los niveles de presión sonora de "*n*" medidas discretas, **tomadas con igual periodo de muestreo**, el Nivel de presión sonora continuo equivalente total viene dado por la expresión:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

Si el periodo de muestreo no es igual para todas las muestras, la expresión del **nivel de presión acústica continuo equivalente** es:

$$L_{eq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n [T_i 10^{\frac{L_i}{10}}] \quad \text{siendo } T = \sum_{i=1}^n T_i$$

Es importante destacar lo siguiente:

El *nivel de presión acústica continuo equivalente* contiene dos conceptos: un **nivel** en *dB* y un **tiempo de exposición**.

La gran importancia del *nivel de presión acústica continuo equivalente* reside en que es el principal parámetro utilizado en la Legislación Española y Comunitaria para la protección de los trabajadores contra el ruido (R.D. 1316/1989 y 86/188/CEE). (Martínez, s.f.)

El nivel de presión acústica continuo equivalente de un ruido constante, es igual al valor constante.

9.5 Nivel de pico

Se define como el nivel en *dB* dado por la expresión (Martínez, s.f.)
:

$$L_{\max} (dB) = 10 \log \left[\frac{P_{\max}}{P_0} \right]^2$$

donde:

L_{max} = Nivel de pico en *dB*.

P_{max} = valor máximo de la presión acústica instantánea en Pa.

El nivel de pico debe medirse sin ponderación en frecuencia y la constante de tiempo del sonómetro usado no ha de ser superior a los 100 microsegundos.

9.6 Nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado "A"

Es el nivel de presión acústica continuo equivalente cuando la presión acústica se mide a través de un **filtro** con ponderación "**A**".(Martínez, s.f.)

Viene dado por la expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right]$$

Siendo:

$L_{Aeq,T}$ = Nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A en dB.

$T = t_2 - t_1$ = Tiempo de exposición.

$p_A(t)$ = Presión sonora instantánea ponderada "A" en Pa

p_0 = Presión de referencia = 20×10^{-6}

9.7 Nivel Diario equivalente

Es el **nivel de ruido continuo equivalente ponderado "A"**, cuando el tiempo de exposición se normaliza a una jornada de trabajo de 8 horas. Si conocemos el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A de un ruido durante un tiempo T, el **nivel diario equivalente** será (Martínez, s.f.):

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \log \frac{T}{8}$$

Siendo:

$L_{Aeq,d}$ = nivel diario equivalente (Tiempo de exposición = 8h) en dB.

T = tiempo de exposición al ruido en h/día.

El **nivel diario equivalente** es, sin duda, el parámetro más importante en la Legislación Española sobre la protección de los trabajadores contra el ruido (R.D. 1316/1989) así como en la Comunitaria (86/188/CEE), ya que ambas legislaciones limitan la exposición de ruido a un nivel diario equivalente de **90 dBA** con dos niveles de acción **80** y **85 dBA** (RD 1316/1989) y **85 dBA** (86/188/CEE). (Martínez, s.f.)

9.8 Ejercicios

Selección única. Marque con una "x"

1. La suma de decibeles está dada por la fórmula:

(I)
$$\text{Suma} = 10 \text{ Log} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \text{ NPS}}$$

(II)
$$\text{Suma} = 10 \text{ Log} 1/8 \sum_{i=1}^n 10^{\text{NPS}}$$

(III)
$$\text{Suma} = 10 \text{ Log} \sum_{i=1}^n 10 * \text{NPS}$$

Resuelva los siguientes problemas:

1. Calcular las sumas de los siguientes niveles sonoros a que está sometido un trabajador que desarrolla su trabajo en una nave industrial en la que recibe el ruido procedente de varias máquinas.

Las máquinas emiten los niveles sonoros siguientes:

- Plegadora: 95 dB
- Prensa: 90 dB
- Fresadora: 91 dB
- Torno: 94 dB

2. Sumar los siguientes valores en decibeles: 80, 83, 86, 83, 85, 92, 91, 86, 92

10

RESPUESTAS DE EJERCICIOS

Capítulo 4

Selección única. Marque con una "x"

1. (IV)
2. (II)
3. (I)
4. (III)
5. (II)
6. (II)
7. (IV)

Capítulo 5

Selección única. Marque con una "x"

1. (I)

Sopa de Letras

P R O P A G A C I O N I F I C A E J D X
N **A** V U D W L O N **N O I S N E R P M O C**
V **R** L O C I D A D Q S E C R A L A R G T
C **E** V X F K N E M I A M F W Y G N R F G
Z **F R E N T E D E S O N I D O** L J M J F
R **A** L N K W N O I O E H R L F C H B T D
M **C I B O N D A D E S O N I D O** X S Q E
A **C** P U T M A X F S N T F N S T B D I C
G **I** J K L G S A N X C L Q D X U X B **N** N
W **O N X D I F R A C C I O N** Y H D S **P** W
M **N** I T W G N M R F R E C U E N C I **S** G
P C N P P G O O O G F S S Y P Z O U I M
I **P U L S A C I O N E S** H D J K K M S R
C D E W U K A E C V V E D U R E B L U V
O S C I L A C I O N E S T N J J T R G Q
Y M S I R D J F D M L K M X C D A E R O

Capítulo 6

Desarrollo (respuestas abiertas)

Sopa de Letras

W O M D P W C I E N T I F I C A E J V C
 N H V U D W L O N G I T U D D E O N I U
 V E **A I C N A N O S E R** C R A L A R **B E**
 C I V X F K N E M I A M F W Y G N R **R R**
 Z M I I X **I N F R A S O N I D O** J M **A D**
 R W L N K W N O I O E H R L F C H B **N A**
 M P I B L Z D A E T Y P E R I O D O **T S**
O N D A S E S T A C I O N A R I A S E C
 G E J K L G S A N X C L Q D X U X B **S N**
 W Z N X U C O P O V A V A X Y H D S T W
 M J I T W U N M R F R E C U E N C I A G
 P C N P **U L T R A S O N I D O** Z O U I M
 I R T A K V R M G M M J H D J K K M S R
 C **E F E C T O D O P P L E R** R E B L U V
 O T N J J T R G Q Z A X V Z C L O P J K

Capítulo 7

Selección única. Marque con una "x"

1. (V)

Clasifique:

- Refracción
- Eco
- Absorción
- Efecto doppler
- Difracción
- Reflexión

Capítulo 8

Selección única

1. (II)

2. (III)

Capítulo 9

Selección única

1. (I)

Problemas

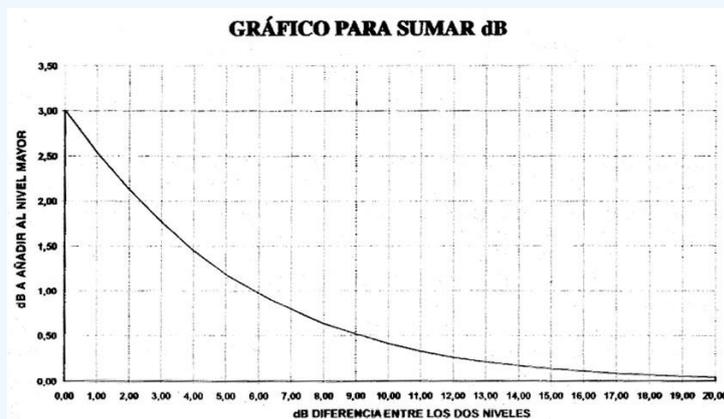
1. Solución:

Datos ordenados de menor a mayor: 90; 91; 94; 95

Resolución gráfica:

Mediante el gráfico de suma:

Sumar dB	DIFERENCIA NUMÉRICA	LECTURA EN GRÁFICO	RESULTADO
(90) más (91)	91 - 90 = 1	Eje x = 1; Eje y = 2,5	91 + 2,5 = 93,5
(93,5) más (94)	94 - 93,5 = 0,5	Eje x = 0,5; Eje y = 2,7	94 + 2,7 = 96,7
(96,7) más (95)	96,7 - 95 = 1,7	Eje x = 1,7; Eje y = 2,2	96,7 + 2,2 = 98,9



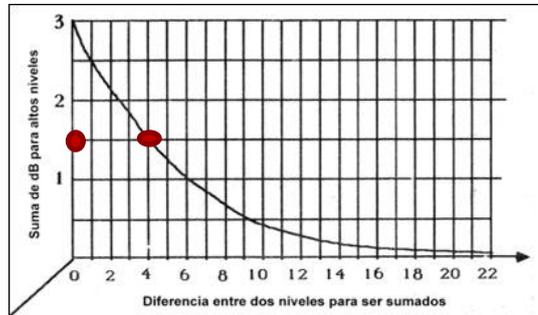
▲ Subir

Resolución mediante cálculo:

$$N_T = 10 \times \log \left(10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{91}{10}} + 10^{\frac{94}{10}} + 10^{\frac{95}{10}} \right) = 98,99 \text{ dB}$$

2. Solución:

- Ordenar los valores en orden descendente: 92, 92, 91, 86, 86, 85, 83, 83, 80
- Tomar los dos primeros valores y sacar la diferencia: 92 - 92 = 0
- El valor 0 se proyectó hasta contactar la curva y se obtiene el valor: 3
- El nuevo valor será: 92 + 3 = 95
- El nuevo (95) se compara con el tercer valor (91): 95 - 91 = 4
- Repetir los pasos hasta obtener una diferencia igual o superior a 20 dB



11

BIBLIOGRAFIA

Brüel& Kjær. (2000). Ruido Ambiental. Recuperado el 10 de Agosto del 2015, de <http://www.bksv.com/doc/br1630.pdf>

Carmen, 2010. El sonido se refleja: el eco y la reverbación. Recuperado el 11 de octubre del 2015, de <https://mcarmerfer.wordpress.com/2010/08/16/el-sonido-y-su-propagacion/>

Chinchilla, R. (2013). Salud y Seguridad en el trabajo. EUNED.

Esther. (2015). Contaminación acústica. Recuperado el 3 de septiembre del 2015, de <http://elblogverde.com/contaminacion-acustica/>

Eumus, 2013. Física del sonido. Escuela Universitaria de Música. Uruguay. Recuperado el 12 de octubre del 2015, de http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza//acustica/apuntes/material-viejo/fisica_r/

Fisic, s.f. Propagación del sonido. Recuperado el 11 de octubre del 2015, de <http://www.fisic.ch/cursos/primer-medio/velocidad-del-sonido/>

Fisic, s.f. Ondas estacionarias. Recuperado el 11 de octubre del 2015, de <http://www.fisic.ch/cursos/primer-medio/interferencia-y-superposici%C3%B3n/>

Fisic, s.f. Fenómenos ondulatorios. Recuperado el 11 de octubre del 2015, de <http://www.fisic.ch/cursos/primer-medio/fen%C3%B3menos-sonoros/>

Fisic, s.f. Efecto Doppler. Recuperado el 11 de octubre del 2015, de <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/SonidoOndas.htm>

Gustavo Fornés, (2015). Estudios sonoros en Banda de Octavas. 22 de julio del 2015. Recuperado el 20 de octubre del 2015, de <http://gustavofornes.com.ar/higiene/estudios-sonoros-en-banda-de-octavas>

Las Palmas de G.C. (2004). La contaminación acústica. Recuperado el 3 de septiembre del 2015, de <http://www.ecologistasenaccion.org/article5350.html>

MAAM, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, (2011). Conceptos básicos del Ruido Ambiental. Recuperado el 17 de agosto del 2015, de http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/contaminacion_acustica_tcm7-1705.pdf

MANCERA, (s.f.). Teste sobre ruido. Recuperado el 28 de agosto del 2015, de http://libroweb.alfaomega.com.mx/catalogo/seguridad-e-higiene-industrial-1/libreacceso/libreacceso/reflector/data/pres_evaluativas/CAP_7_testruido.pdf

Miyara, Federico. (s.f.). La naturaleza del sonido. Recuperado el 15 del 2015, de <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/comite/sonido.htm>

Mikl, Ken; Burgess, Marion (2009). Manual del estudiante: Ruido-Medición y sus efectos. Recuperado el 14 de agosto del 2015, de <http://www.ohlearning.com/Files/Student/JC22%20v1-0%2009Apr10%20W503%20Manual%20del%20estudiante%201.pdf>

Martínez, Pilar. (s.f.). Parámetros que definen el ruido. Universidad de Córdoba. Recuperado el 20 de octubre del 2015, de [http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(1\)%20prop%20fis%20del%20ruido/param%20que%20definen%20el%20ruido.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(1)%20prop%20fis%20del%20ruido/param%20que%20definen%20el%20ruido.htm)

Martínez, Pilar. (s.f.). Parámetros que definen el ruido: Suma de niveles de presión acústica en dB. Universidad de Córdoba. Recuperado el 12 de octubre del 2015, de [http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(1\)%20prop%20fis%20del%20ruido/param%20que%20definen%20el%20ruido.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(1)%20prop%20fis%20del%20ruido/param%20que%20definen%20el%20ruido.htm)

Miyara, Federico. (s.f.). Niveles Sonoros. Recuperado el 10 de Agosto del 2015, de <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/comite/niveles.htm>

PROCAME, 2007. Documentos varios curso Salud Ocupacional

Profesor en Línea, (s.f.). Ondas y Sonido. Santiago, Chile Recuperado el 14 de agosto del 2015, de <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/SonidoOndas.htm>

Profesor en Línea, (s.f.). Aplicaciones del ultrasonido. Santiago, Chile. Recuperado el 14 de octubre del 2015, de <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/ultrasonidoAPLICAC.htm>

Profesor en Línea, (s.f.). Sonidos y Ondas: El efecto Doppler. Chile. Recuperado el 14 de octubre del 2015, de <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/SonidoOndas.htm>

Suter, Alice H. (s.f.). Ruido: Riesgos Generales. Recuperado el 5 de septiembre del 2015, de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/47.pdf>

12 LINKS DE INTERÉS

Videos:

11.1 Sonido: Definición y propiedades

https://www.youtube.com/watch?v=1ut_mP005Sc

11.2 Propagación del sonido

<https://www.youtube.com/watch?v=wKTXDqXXCLY>

<https://www.youtube.com/watch?v=HawDxKNjib0&feature=youtu.be>

11.3 Sonido: energía y ondas

https://youtu.be/xu0Z_hx4ZTQ

11.4 Efecto Doppler

<https://www.youtube.com/watch?v=pBHIKYQ1228>

<https://youtu.be/UEBNJqUW5Ok>