



1.1.

Propagación del sonido en ambiente exterior (ISO 9613)

Josep Martí Carceller
dBplus consultores acústicos
jmarti@dBplusacoustics.com



Documentación:

Josep Martí Carceller
ENG La Salle

Índice

- Introducción
- Atenuación del sonido en ambiente exterior
 - El sumatorio de atenuaciones
 - Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes puntuales alineadas
 - Fuentes lineales
 - Fuentes planas
 - Atenuación debida al medio de propagación
 - Atenuación por absorción atmosférica
 - Impedancia característica del medio
 - Gradientes de viento y temperatura
 - Atenuación por elementos del escenario
 - Atenuación por absorción del terreno
 - Atenuación por absorción de la vegetación
 - Atenuación por obstáculos y barreras

Índice

- Introducción
- Atenuación del sonido en ambiente exterior
 - El sumatorio de atenuaciones
 - Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes puntuales alineadas
 - Fuentes lineales
 - Fuentes planas
 - Atenuación debida al medio de propagación
 - Atenuación por absorción atmosférica
 - Impedancia característica del medio
 - Gradientes de viento y temperatura
 - Atenuación por elementos del escenario
 - Atenuación por absorción del terreno
 - Atenuación por absorción de la vegetación
 - Atenuación por obstáculos y barreras

Introducción

- Objetivos de la sesión:
 - Analizar el comportamiento de las ondas sonoras en un medio abierto.
 - Conocer los diversos factores que pueden afectar a la propagación del sonido.
 - Conocer el método general de cálculo de propagación del sonido en ambiente exterior según ISO 9613-2.
 - Aprender a determinar el impacto que una fuente sonora genera sobre un receptor dado cuando el ruido se propaga por el ambiente exterior.
- Deberemos caracterizar 3 elementos:
 - El foco de ruido o EMISOR
 - El camino o MEDIO DE PROPAGACIÓN
 - El elemento RECEPTOR

Introducción

- Caracterización del EMISOR:
 - Tarea bastante cuantificable y objetivable
 - Determinación del nivel de potencia acústica.
 - Espectros de emisión, índice de directividad....
- Caracterización del MEDIO DE PROPAGACIÓN:
 - Caracterización más compleja
 - Acústica teórica: Medio ideal e invariable
 - Acústica “real”: Medio no ideal y heterogéneo, con condiciones variables
 - Existe una parte cuantificable y una parte de aproximación y criterio técnico, por lo que la caracterización del medio incorpora una mayor incertidumbre asociada.
- Caracterización del RECEPTOR
 - Tarea cuantificable y objetivable
 - Criterios normativos: Legislación, grado de sensibilidad...
 - Criterios de confort: Molestias por ruido...

Introducción

- ISO 9613-2: *Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General Method of Calculation*
 - Especifica un método de ingeniería para predecir los niveles de ruido ($L_{Aeq,T}$) a esperar en un receptor dado para focos con una emisión conocida.
 - En su mayor parte, considera condiciones meteorológicas favorables a la propagación del sonido (DownWind Conditions).
 - Adicionalmente, incorpora un método para calcular un nivel de presión evaluado sobre un periodo de tiempo largo, LAT (Long Term), el cual incluye correcciones para una variedad de condiciones atmosféricas.
 - Incorpora formulación para calcular factores de atenuación debidos a distintos fenómenos. El cálculo está definido por bandas de octava de 63 a 8KHz y para fuentes puntuales aisladas o agrupadas, ya sean estacionarias o en movimiento.
 - El método es aplicable a una gran variedad de situaciones, tales como:
 - La mayoría de situaciones de ruido de tráfico o ferroviario y fuentes de ruido de industria, así como un gran abanico de actividades.
 - No es aplicable a: Ruido de aviones en vuelo o ruido de explosiones (actividades mineras o militares)

Índice

- Introducción
- Atenuación del sonido en ambiente exterior
 - El sumatorio de atenuaciones
 - Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes puntuales alineadas
 - Fuentes lineales
 - Fuentes planas
 - Atenuación debida al medio de propagación
 - Atenuación por absorción atmosférica
 - Impedancia característica del medio
 - Gradientes de viento y temperatura
 - Atenuación por elementos del escenario
 - Atenuación por absorción del terreno
 - Atenuación por absorción de la vegetación
 - Atenuación por obstáculos y barreras

El sumatorio de atenuaciones

- El nivel de presión en un receptor dado dependerá de:
 - La potencia (L_w) y factor de directividad (DI) de la fuente.
 - Las atenuaciones debidas a distintos factores ($\sum Att$).

$$LA_{eq,T} = L_w + DI - \sum Att$$

$$\sum Att = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{misc} + A_{bar}$$

- **A_{div}** = Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
- **A_{atm}** = Atenuación debida a la absorción atmosférica
- **A_{gr}** = Atenuación debida al suelo
- **A_{misc}** = Atenuación debida a otros efectos (bosques, vegetación, zonas edificadas....)
- **A_{bar}** = Atenuación debida a una barrera

Índice

- Introducción
- Atenuación del sonido en ambiente exterior
 - El sumatorio de atenuaciones
 - Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes puntuales alineadas
 - Fuentes lineales
 - Fuentes planas
 - Atenuación debida al medio de propagación
 - Atenuación por absorción atmosférica
 - Impedancia característica del medio
 - Gradientes de viento y temperatura
 - Atenuación por elementos del escenario
 - Atenuación por absorción del terreno
 - Atenuación por absorción de la vegetación
 - Atenuación por obstáculos y barreras

Divergencia geométrica

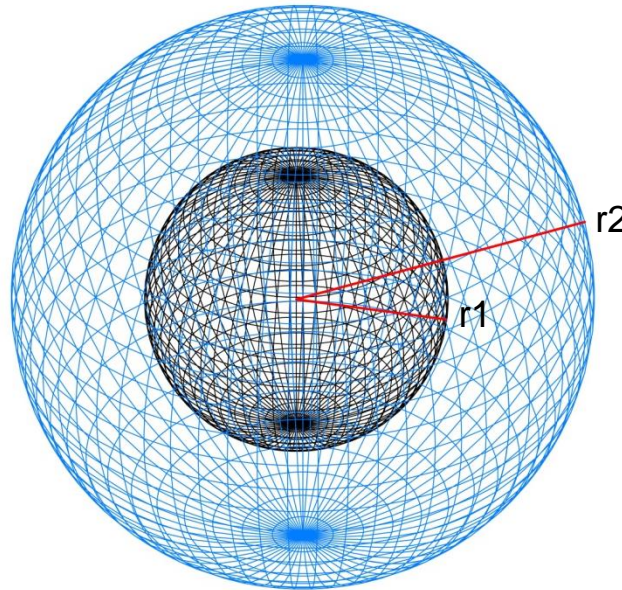
- Es la causa predominante de la atenuación de la intensidad sonora en ambiente exterior.
- Es imputable a la dinámica de propagación de un movimiento de partículas en el aire. Se define como la figura geométrica que dibujan todos los puntos del espacio que están en fase de un mismo ciclo.
- Se debe a la ecuación que relaciona la potencia y la intensidad sonora:

$$I = \frac{W}{S}$$

- A medida que la onda sonora se aleja de la fuente, la superficie sobre la que se “reparte” la potencia radiada es mayor
- A una potencia dada (característica intrínseca a la fuente), la intensidad percibida es menor a medida que aumenta la distancia entre foco y receptor

Fuentes puntuales

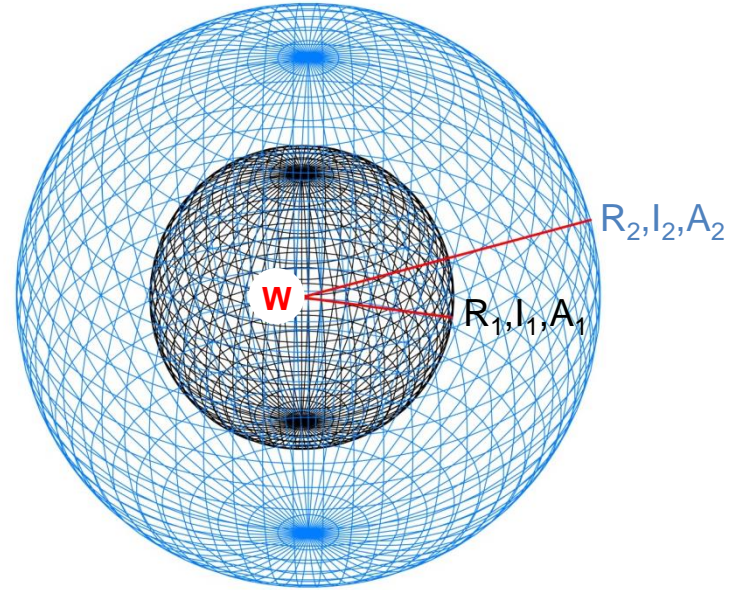
- Caso elemental y más sencillo: un foco emisor ideal y omnidireccional de tamaño pequeño en relación a la distancia entre fuente y receptor
- Cualquier fuente, por grande que sea, tiende a comportarse como puntual a medida que nos alejamos de ella a suficiente distancia.
- La figura geométrica que dibujan todos los puntos del espacio que están en fase es una esfera.



Fuentes puntuales

$$I_1 = \frac{W}{A_1} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2}$$

$$I_2 = \frac{W}{A_2} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2}$$



$$\Delta dB = NI_1 - NI_2 = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{1_{pW/m^2}}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{1_{pW/m^2}}\right) =$$

$$= 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{1_{pW/m^2}} \bigg/ \frac{I_2}{1_{pW/m^2}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{R_2^2}{R_1^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Fuentes puntuales

- Ley cuadrática inversa:

Al doblar la distancia el nivel de intensidad disminuye en 6dB

$$\Delta dB = 20 \cdot \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot R_1}{R_1} \right) = 6dB / dd$$

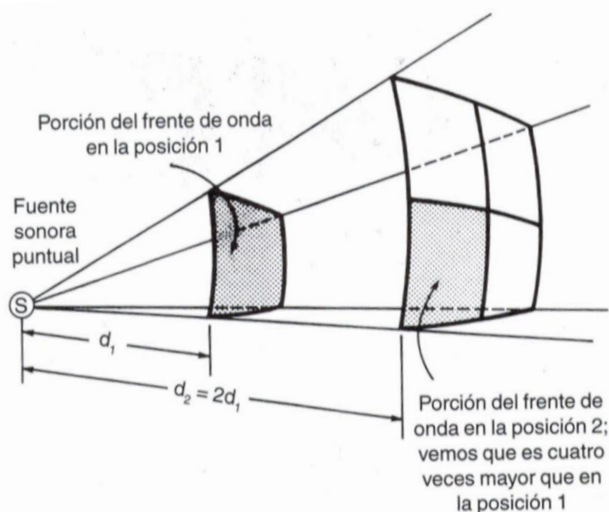
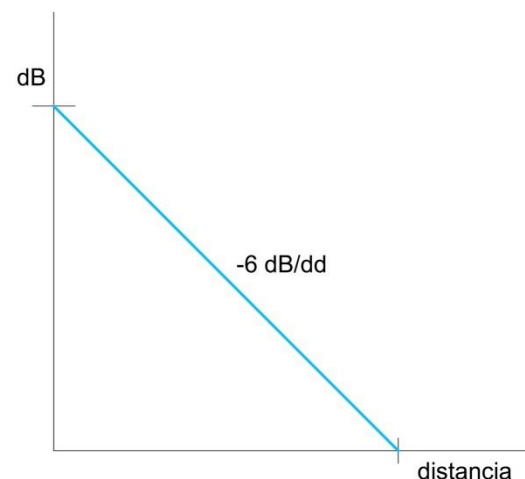


Figura 1.24. Propagación esférica desde una fuente monopolo.

Ref. [3]: H. Arau Puchades
ABC de la Acústica Arquitectónica



Fuentes puntuales

- Relación entre potencia y presión

La intensidad depende de la impedancia característica del aire

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho \cdot c}$$

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}} = 10 \cdot \log \frac{p_{rms}^2}{(\rho \cdot c) \cdot I_{ref}} = 10 \cdot \log \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} + 10 \cdot \log \frac{p_{ref}^2}{(\rho \cdot c) \cdot I_{ref}} = L_p + 10 \cdot \log \frac{p_{ref}^2}{(\rho \cdot c) \cdot I_{ref}}$$

Este factor añadido al nivel de presión se puede considerar despreciable en condiciones habituales de temperatura y presión atmosférica:

$$10 \cdot \log \frac{p_{ref}^2}{(\rho \cdot c) \cdot I_{ref}} \leq \pm 0.5 \Rightarrow L_p \approx L_I$$

Fuentes puntuales

- Relación entre potencia y presión

A partir de la igualación de nivel de presión y nivel de intensidad:

$$I = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \qquad L_p \approx L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}} = 10 \cdot \log \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot I_{ref}}$$

$$L_I \approx L_p = L_W - 10 \cdot \log(4 \cdot \pi) - 20 \cdot \log(r)$$

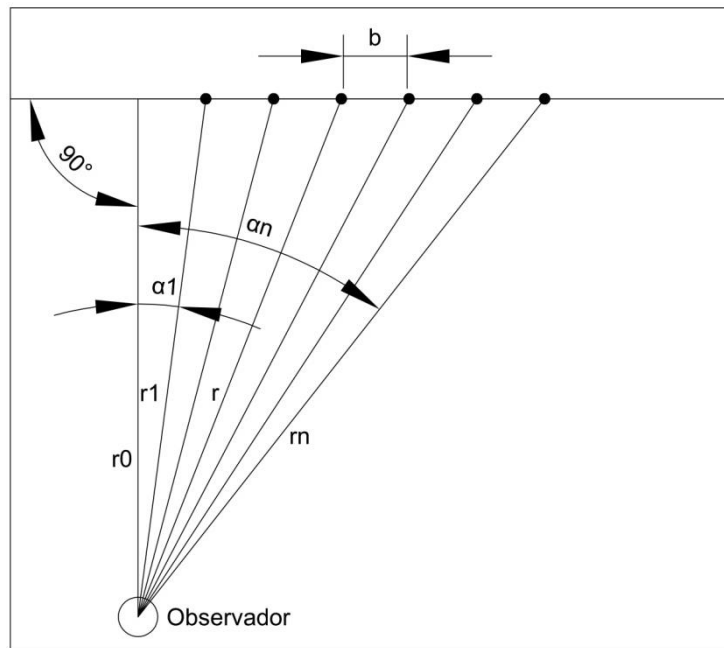
Si añadimos el índice de directividad (DI)

$$L_p = L_W + DI - 10 \cdot \log(4 \cdot \pi) - 20 \cdot \log(r)$$

$$L_p = L_W + DI - 20 \cdot \log(r) - 11dB$$

Fuentes puntuales alineadas

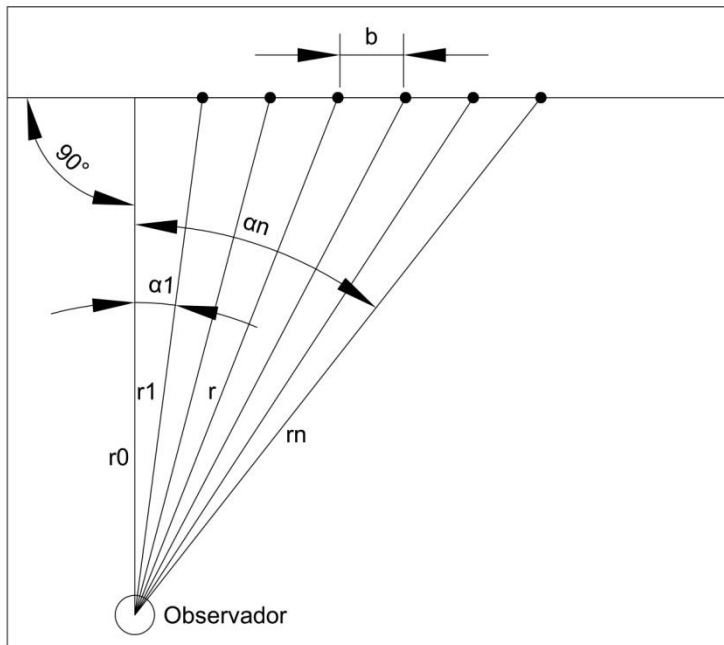
- Supongamos una agrupación de n fuentes puntuales, las cuales:
 - Están alineada a una distancia r_0 del receptor
 - Son equidistantes entre sí a una distancia b
 - Radian una potencia W_1 cada una de ellas



Fuentes puntuales alineadas

- El observador recibirá la contribución energética de todas las fuentes:

$$L_P = \sum_{i=1}^n L_{Pi}$$



$$L_{P1} = L_{W1} + DI - 20 \cdot \log(r_1) - 11$$

$$L_{P2} = L_{W1} + DI - 20 \cdot \log(r_2) - 11$$

$$L_{Pn} = L_{W1} + DI - 20 \cdot \log(r_n) - 11$$

Fuentes puntuales alineadas

- Al resolver la serie, conociendo que la única variable es la distancia r_i entre cada fuente y el receptor

$$L_p = L_{w_1} + DI + 10 \cdot \log \left(\frac{\alpha_n - \alpha_1}{r_0 \cdot b} \right) + \Delta L - 11$$

- Donde el factor de corrección ΔL relaciona la distancia del observador a la línea de fuentes con la distancia de separación entre éstas:

$$\Delta L = 10 \cdot \log \left(\frac{b}{r_0} \cdot \frac{\cos^2 \alpha_1}{(\alpha_n - \alpha_1)} \cdot \sum_{m=1}^n \left\{ \frac{1}{1 + (m-1) \cdot \frac{b}{r_0} \cdot \cos \alpha_1 \left[(m-1) \cdot \frac{b}{r_0} \cdot \cos \alpha_1 + 2 \cdot \sin \alpha_1 \right]} \right\} \right)$$

Fuentes puntuales alineadas

- Si se dan las siguientes condiciones:
 - $n \geq 3$ (Hay más de 3 fuentes).
 - Y se cumple la siguiente condición: $\frac{r_0}{b \cdot \cos \alpha_1} \geq \frac{1}{\pi}$
- Entonces el término $\Delta L < 1\text{dB}$ y lo podemos despreciar, y:

$$L_P = L_{W_1} + DI + 10 \cdot \log \left(\frac{\alpha_n - \alpha_1}{r_0 \cdot b} \right) - 11$$

- Si no se cumplen las condiciones:
 - Hay menos de 3 fuentes, es más sencillo analizarlas individualmente y sumar.
 - El observador está demasiado cercano a la línea de fuentes
 - Las fuentes están demasiado espaciadas.
 - Nos encontramos a un lado del “array de fuentes” y la más cercana predominará sobre el total.

Fuentes puntuales alineadas

- Si, además, realizamos la siguiente suposición:
 - Tenemos un número infinito de fuentes $\alpha_n - \alpha_1 \approx \pi$
 - Están muy juntas entre ellas ($b \downarrow$; $r_0 \geq b/\pi$)

$$L_P = L_{W_1} + DI + 10 \cdot \log \left(\frac{\alpha_n - \alpha_1}{r_0 \cdot b} \right) - 11$$

$$L_P = L_{W_1} + DI + 10 \cdot \log \left(\frac{\pi}{r_0 \cdot b} \right) - 11 = L_{W_1} + DI + 10 \cdot \log (r_0 \cdot b) - 6$$

- Este tipo de fuentes se atenúan 3dB al doblar la distancia

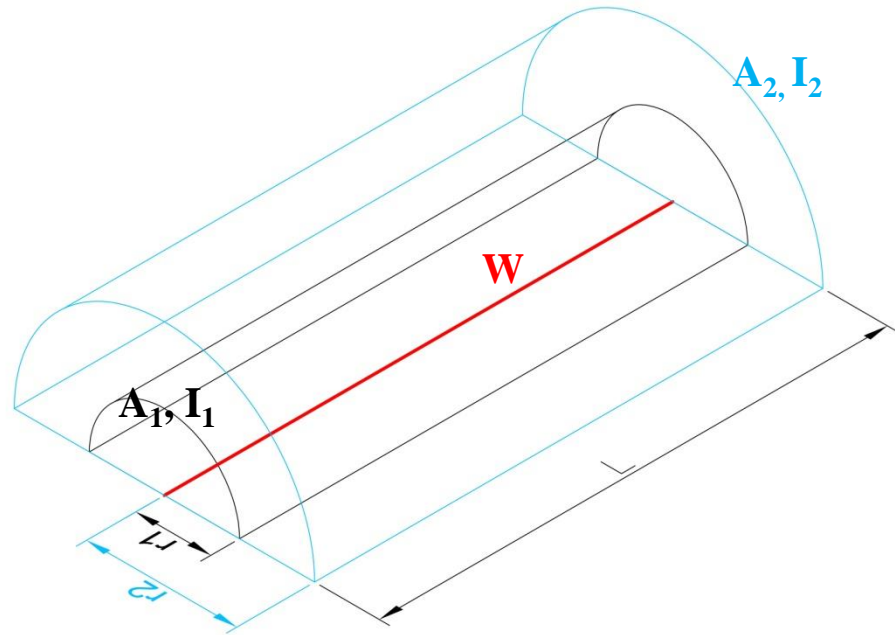
$$L_{P1} - L_{P2} = 10 \cdot \log \left\{ \frac{r_2}{r_1} \right\}$$

Fuentes lineales

- Una series de fuentes puntuales agrupadas y muy cercanas generará un frente de ondas esférico individual para cada fuente, y la fuente vista en conjunto seguirá un patrón de radiación de geometría cilíndrica:

$$I_1 = \frac{W}{A_1} = \frac{W}{L \cdot \pi \cdot R_1}$$

$$I_2 = \frac{W}{A_2} = \frac{W}{L \cdot \pi \cdot R_2}$$



- También tienen este patrón de radiación las fuentes puntuales en movimiento, a partir de cierta velocidad

Fuentes lineales

- Al doblar la distancia se atenúan 3dB

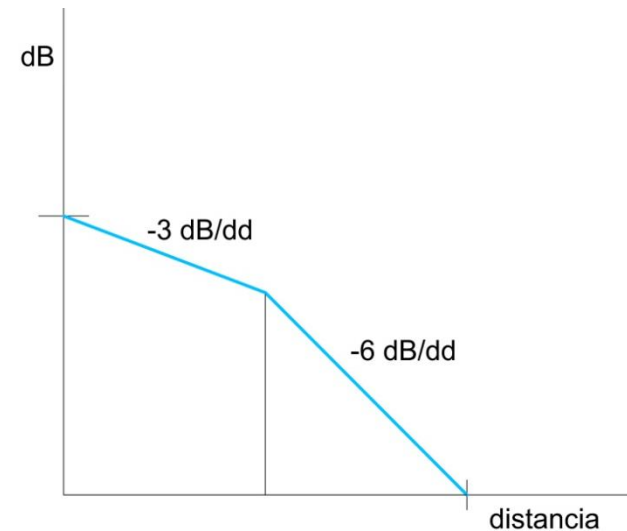
$$I_1 = \frac{W}{A_1} = \frac{W}{L \cdot \pi \cdot R_1}$$

$$I_2 = \frac{W}{A_2} = \frac{W}{L \cdot \pi \cdot R_2}$$

$$\Delta dB = NI_1 - NI_2 = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{1_{pW/m^2}}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{1_{pW/m^2}}\right) =$$

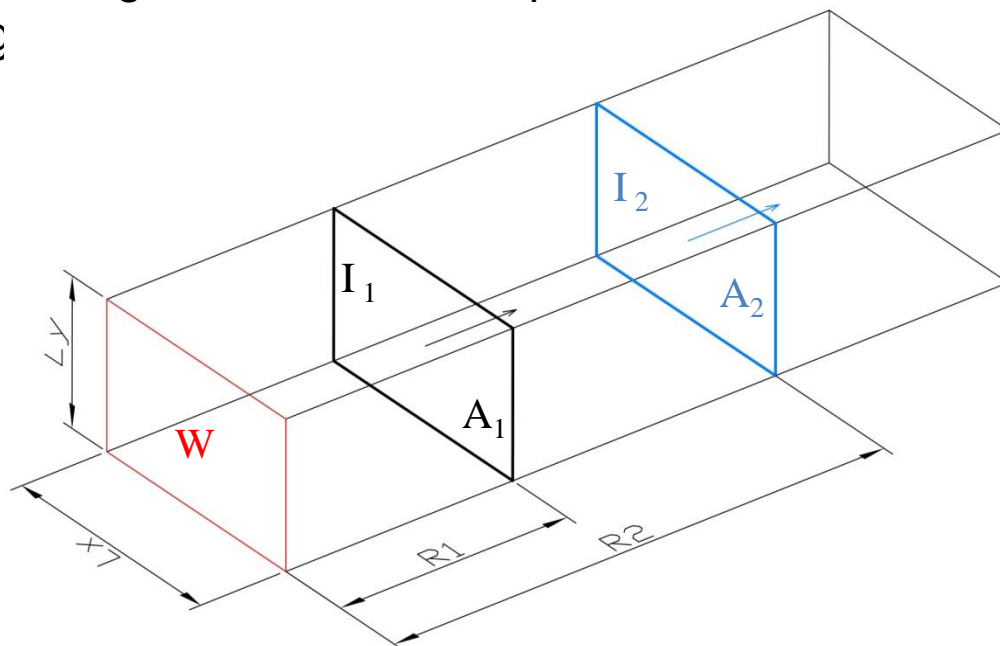
$$= 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{1_{pW/m^2}} \bigg/ \frac{I_2}{1_{pW/m^2}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\Delta dB = 10 \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot R_1}{R_1}\right) = 3 dB/dd$$



Fuentes planas

- En las fuentes planas, como no aumenta la superficie sobre la que “reparte” la potencia, no disminuye la intensidad cuando aumenta la distancia
- Fuentes de gran tamaño en su proximidad se asimilan a este tipo de propag



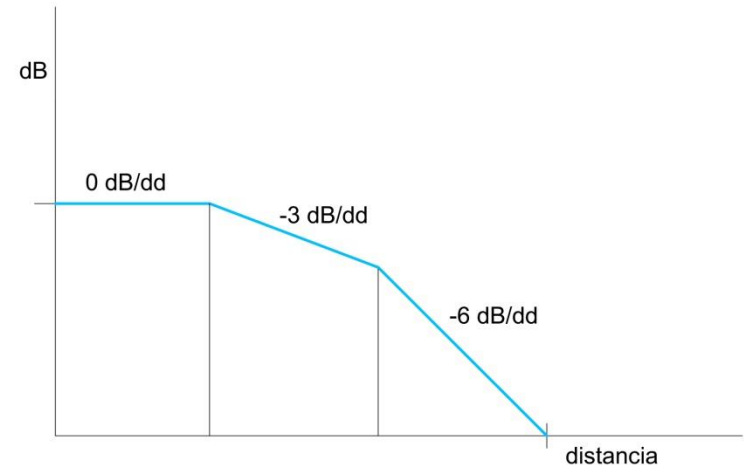
$$I_1 = \frac{W}{A_1} = \frac{W}{A}$$

$$I_2 = \frac{W}{A_2} = \frac{W}{A}$$

$$\Delta dB = 10 \cdot \log \left(\frac{A_2}{A_1} \right) = 0 dB / dd$$

Fuentes planas

- A medida que aumenta la distancia a la fuente, las ondas sonoras siempre tenderán a tomar un patrón de propagación esférico.
- Se dará una transición progresiva entre divergencias a medida que nos alejamos de la fuente.
- La distancia entre transiciones dependerá principalmente del tamaño de la fuente.
- Ej.1: La puerta de una nave industrial, a corta distancia, generará ondas prácticamente planas.
- Ej. 2: En el perímetro de un recinto industrial, deberemos desglosar entre varios focos de ruido.
- Ej. 3: A suficiente distancia, toda una nave se podrá considerar como puntual.



Índice

- Introducción
- Atenuación del sonido en ambiente exterior
 - El sumatorio de atenuaciones
 - Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes puntuales alineadas
 - Fuentes lineales
 - Fuentes planas
 - Atenuación debida al medio de propagación
 - Atenuación por absorción atmosférica
 - Impedancia característica del medio
 - Gradientes de viento y temperatura
 - Atenuación por elementos del escenario
 - Atenuación por absorción del terreno
 - Atenuación por absorción de la vegetación
 - Atenuación por obstáculos y barreras

Atenuación por absorción atmosférica

- Se debe principalmente a 2 factores
 - A la pérdida de energía sonora por transformación de energía cinética y de presión en temperatura (fenómeno de viscosidad).
 - A la pérdida de energía sonora por excitación de las moléculas de oxígeno y nitrógeno.
- Es altamente dependiente de la frecuencia, la temperatura ambiente y la humedad relativa, pero sólo ligeramente de la presión ambiental.
- La ISO 9613-2 proporciona coeficientes de absorción atmosférica (α) en dB por km.
- El cálculo de la atenuación en dB a una distancia d , en metros, se calcula del siguiente modo:

$$A_{atm} = \frac{\alpha \cdot d}{1000}$$

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

Atenuación por absorción atmosférica

Tempera- ture °C	Relative humidity %	Atmospheric attenuation coefficient α , dB/km							
		Nominal midband frequency, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

- Las condiciones atmosféricas a escoger deben basarse en las condiciones habituales del territorio a estudiar.
- Para coeficientes en otras condiciones atmosféricas, se debe consultar la Parte 1 de la ISO 9613, la cual detalla el método numérico de cálculo.
- Para distancias pequeñas se puede despreciar.

Impedancia característica del medio

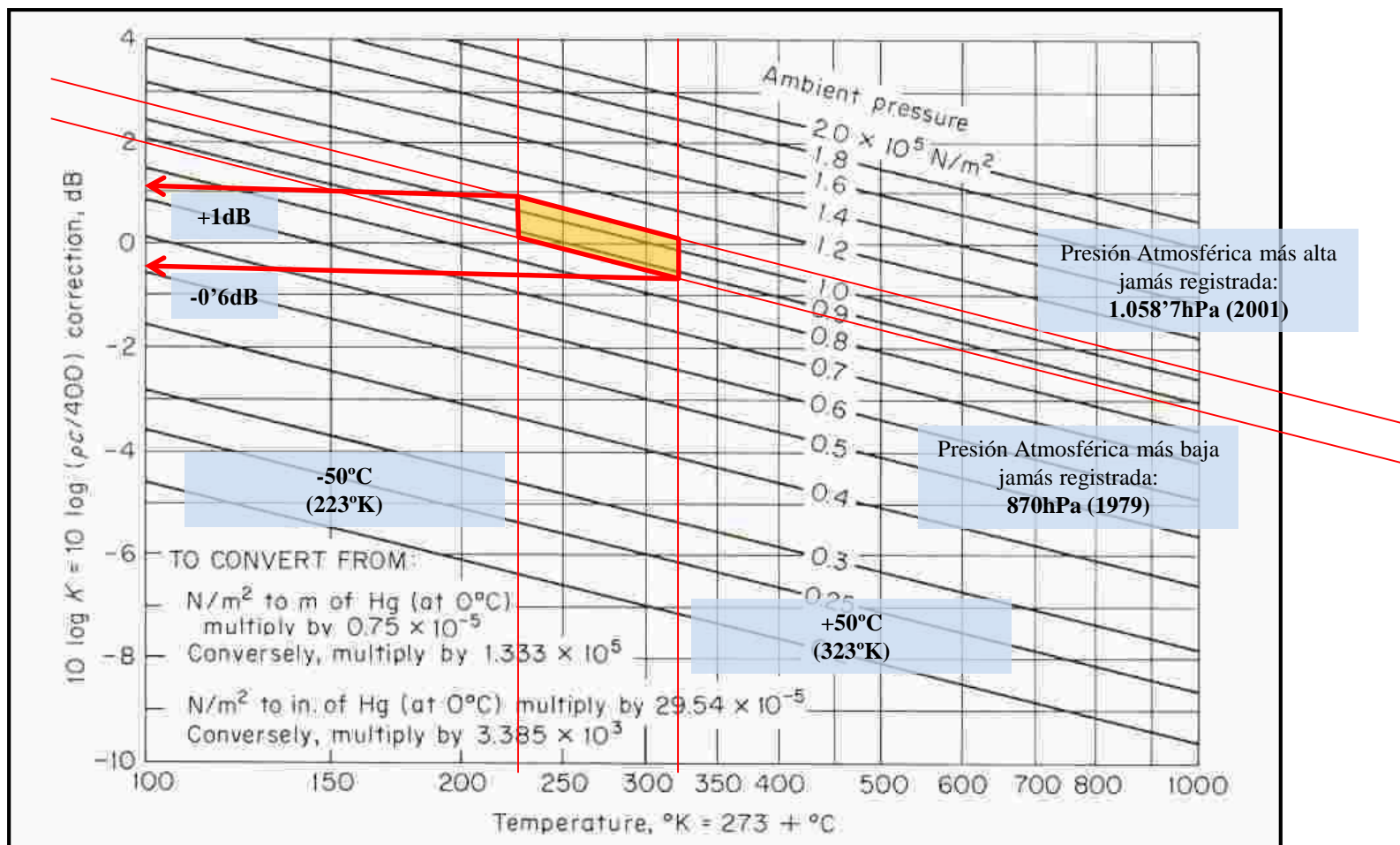
- Para caracterizar el aire como medio de propagación se asumen unas condiciones estándar en relación a la temperatura y presión.
- No obstante el comportamiento real del medio depende de su impedancia característica.
- En desviaciones muy grandes de temperatura o presión se debería contemplar la variación de la impedancia característica, ya que en este caso:

$$L_p \neq L_i$$

$$10 \cdot \log \frac{p_{ref}^2}{(\rho \cdot c) \cdot I_{ref}} \geq 0.5$$

- No obstante, en la gran mayoría de situaciones, este factor será despreciable

Impedancia característica del medio



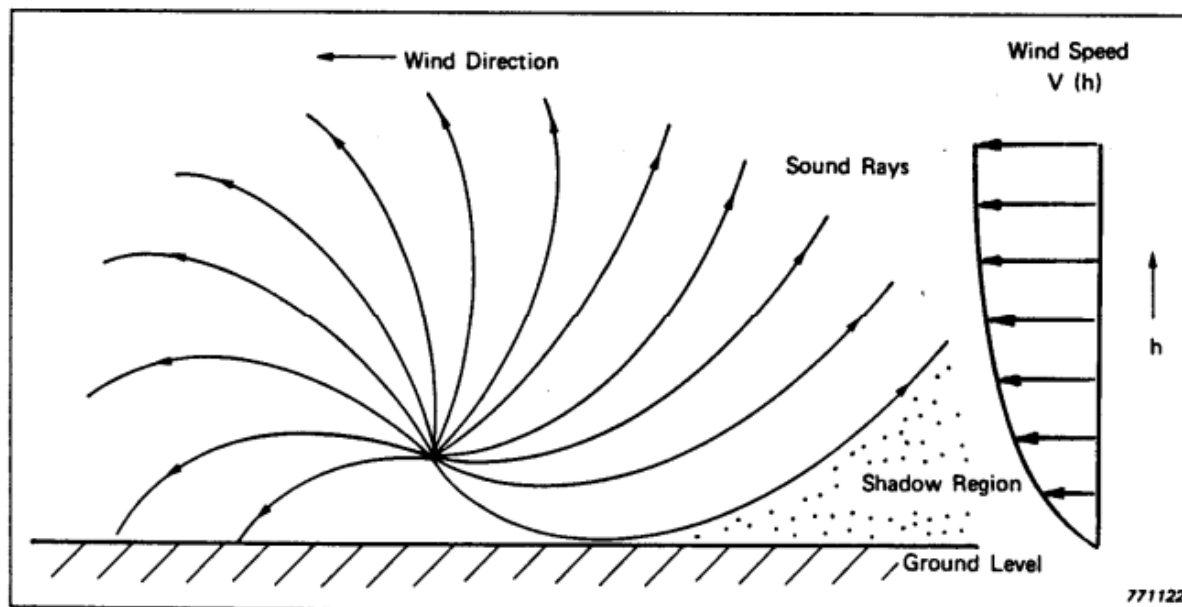
Ref. [2]: L. L. Beranek & I. L. Vér
Noise and Vibration Control Engineering

Gradientes de viento y temperatura

- La variación de temperatura y de velocidad del viento en función de la altura provoca que la velocidad de propagación del sonido también varíe con la altura.
- Estas variaciones, “curvan” el sonido, alterando de este modo la forma del frente de onda.
- Tienen un efecto importante en la propagación del sonido en ambiente exterior, especialmente a grandes distancias.
- Las turbulencias de aire que se dan debido a la morfología del terreno y a obstáculos también provocan variaciones en el nivel de presión sonora. No obstante, cuando hablamos de gradientes de viento, no estamos contemplando estas turbulencias por orografía, sino la variación de la velocidad en función de la altura de propagación.

Gradientes de viento

- Es una variación progresiva de la velocidad media de desplazamiento del aire a medida que aumenta la altura.
- Normalmente, a 0m la velocidad del viento es menor y ésta aumenta hasta un valor constante a medida que también aumenta la altura (gradiente positivo).



Ref. [4]: J. Lamancusa
Outdoor sound propagation

Gradientes de viento

- Como el aire es el medio transmisor del sonido, su velocidad provoca efectos evidentes sobre la propagación:
 - El sonido se propaga con mayor facilidad con el viento a favor (DownWind).
 - El sonido tiene mayor dificultad en propagarse con el viento en contra (UpWind).
 - El gradiente de viento puede crear zonas de sombra acústica.
 - Además de la velocidad, el viento también provoca fluctuaciones de presión debido a las turbulencias generadas por la geografía y los obstáculos.
- La formulación de la ISO 9613-2 es válida para las siguientes condiciones de propagación (DownWind propagation conditions)
 - Dirección del viento en $\pm 45^\circ$ del vector que une la fuente predominante y receptor.
 - Velocidades de viento de 1m/s a 5m/s medido entre 3 y 11m de altura
 - Para el cálculo del nivel de presión sonora *Long Term* $LA_T(LT)$, se especifica el cálculo de una corrección meteorológica *C_{met}* que contempla la estadística anual de velocidades y direcciones del viento de la zona a estudiar. Este factor puede ser de mucha importancia para ciertas situaciones (Ej: parques eólicos).

Gradientes de temperatura

- Es una variación progresiva de la temperatura del aire a medida que también lo hace la altura.
- Conocemos la influencia de la temperatura en la velocidad de propagación del sonido en el aire:

$$c = 331,4 + 0,607 t$$

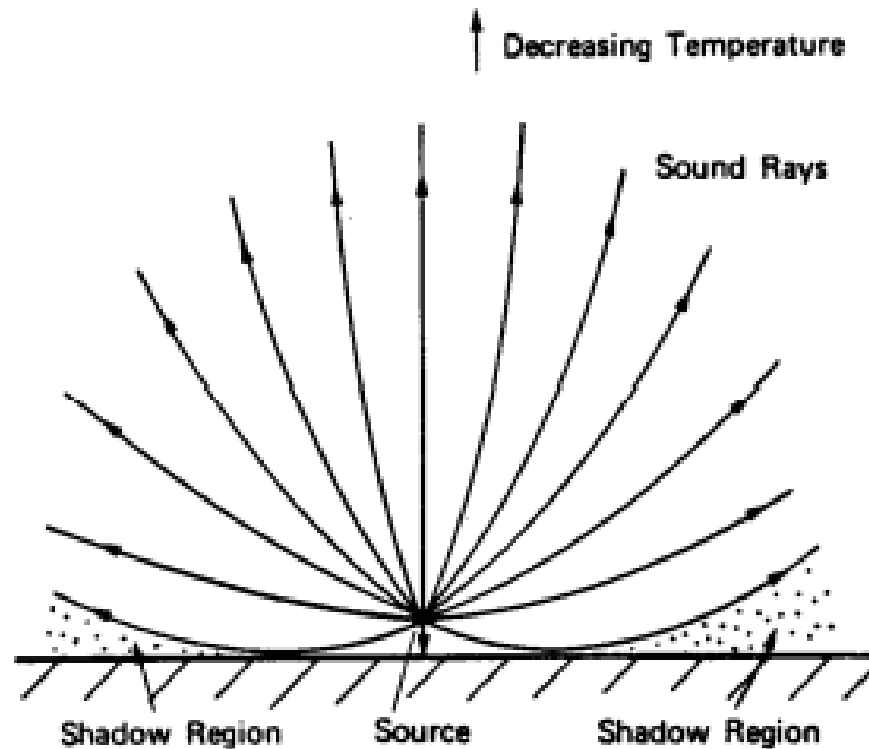
- Donde t es la temperatura del aire en °C
- Cuando la temperatura varía, también lo hace la velocidad del sonido. Esto “deforma” el frente de ondas, que toma trayectorias curvas.
- El gradiente de temperatura puede ser:
 - Negativo (temperatura decreciente con la altura).
 - Positivo (temperatura creciente con la altura).
 - Escalonado (concatenación de más de dos gradientes).

Gradientes de temperatura

- Gradiente de temperatura negativo
 - Es el más habitual y predominante a gran escala (a gran altura siempre hace más frío que a baja altura)
 - El sonido alcanza mayor velocidad a baja altura.
 - Los frentes de onda tienden a “curvarse” hacia arriba.
 - Provoca la aparición de zonas de sombra, donde el nivel de ruido es menor que en otros equidistantes a la fuente.
 - Es la situación habitual en un día soleado: el aire a ras de suelo es más caliente y las zonas de poca altura tienen una temperatura significativamente mayor que las de alturas mayores.
 - La ISO 9613-2 no tendrá en cuenta las zonas de sombra que puedan aparecer.

Gradientes de temperatura

- Gradiente de temperatura negativo



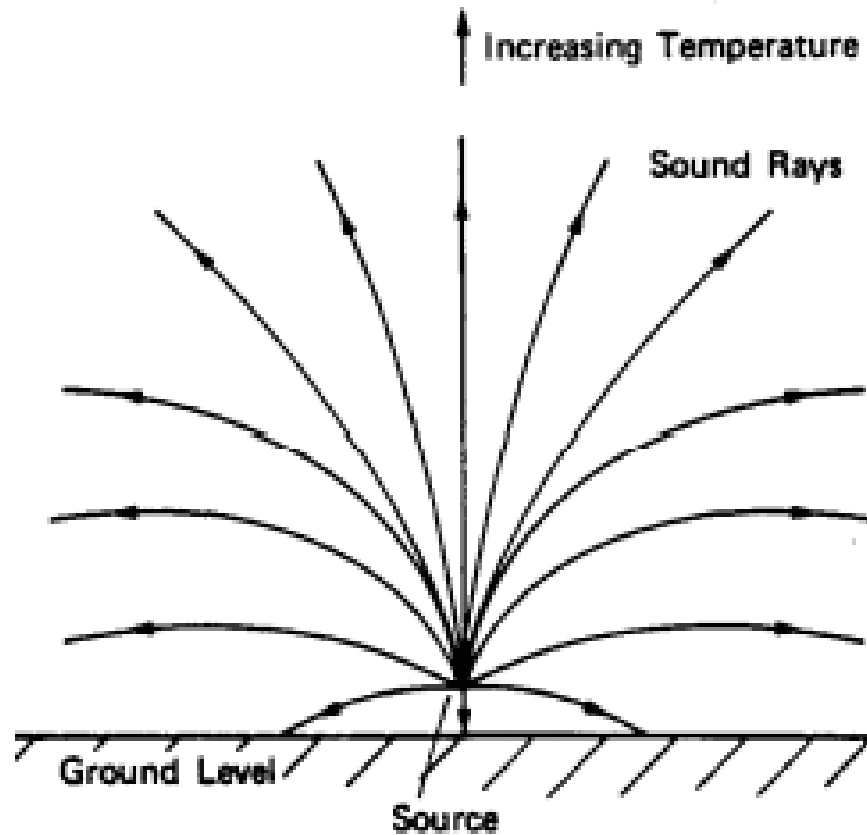
Ref. [4]: J. Lamancusa
Outdoor sound propagation

Gradientes de temperatura

- Gradiente de temperatura positivo (inversión térmica)
 - Suele darse hasta sólo hasta una determinada altura, a partir de la cual el gradiente recupera el signo negativo.
 - El sonido alcanza mayor velocidad en altura que a ras de suelo.
 - Los frentes de onda tienden a “curvarse” hacia el suelo.
 - No provoca la aparición de zonas de sombra.
 - Es la situación habitual de noche: el suelo se enfría, las capas bajas pierden temperatura y unos metros más arriba la temperatura es mayor.
 - También puede suceder en un día soleado sobre un territorio nevado.
 - La formulación de la ISO 9613-2 se considera válida bajo condiciones de inversión térmica moderada, como sucede de noche.
 - Fenómenos de inversión térmica sobre agua o nieve no se tratan en la norma y pueden resultar en niveles de presión sonora mayores a los predichos.

Gradientes de temperatura

- Gradiente de temperatura positivo



Ref. [4]: J. Lamancusa
Outdoor sound propagation

Gradientes de temperatura

- Gradiente de temperatura escalonado
 - Poco habitual y suele durar poco tiempo. Suele empezar con un gradiente negativo, un tramo positivo y luego el habitual gradiente negativo.
 - Los frentes de onda tienden a “curvarse” según el signo del gradiente, dando lugar a un “efecto túnel”.
 - Puede provocar tanto zonas de sombra como canales en los que la distancia de propagación del sonido puede ser muy lejana.
 - Se puede dar en momentos al amanecer o ante cambios de tiempo.
 - Ejemplo: a ras de suelo se mantiene un gradiente positivo, heredado de la noche, mientras el sol empieza a calentar las capas altas de la atmósfera.

Índice

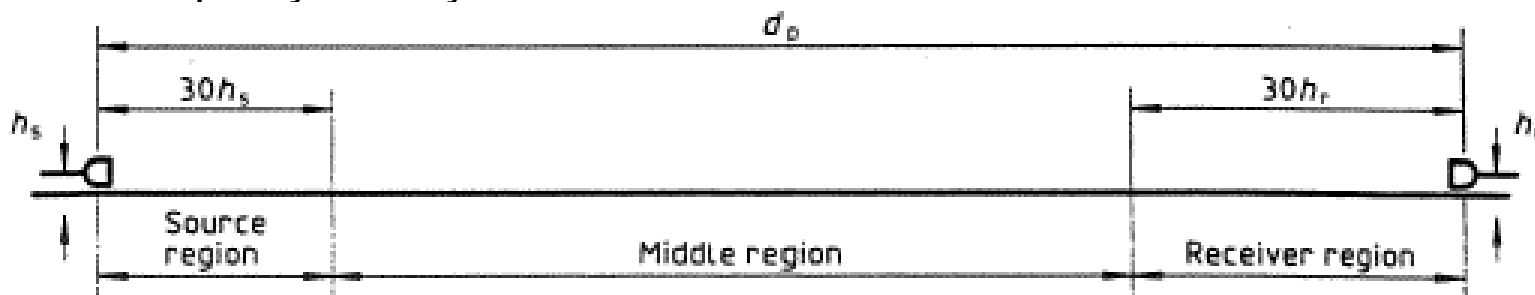
- Introducción
- Atenuación del sonido en ambiente exterior
 - El sumatorio de atenuaciones
 - Atenuación por divergencia geométrica de la fuente
 - Fuentes puntuales
 - Fuentes puntuales alineadas
 - Fuentes lineales
 - Fuentes planas
 - Atenuación debida al medio de propagación
 - Atenuación por absorción atmosférica
 - Impedancia característica del medio
 - Gradientes de viento y temperatura
 - Atenuación por elementos del escenario
 - Atenuación por absorción del terreno
 - Atenuación por absorción de la vegetación
 - Atenuación por obstáculos y barreras

Absorción del terreno

- Principalmente, se debe a la estructura y a las características acústicas de la cubierta del terreno, ya que puede disminuir la energía con la que contribuye el camino reflejado.
- El sonido se propaga mejor sobre superficies reflejantes (roca, agua, suelos mojados...) que en terrenos ondulados, labrados, irregulares....
- A mayor altura de propagación, la absorción del terreno pierde influencia, pero a ras de suelo puede dar índices de atenuación superiores a lo esperado.
- El factor de atenuación está definido principalmente por las propiedades del suelo cercano a la fuente y al receptor, y la zona de suelo “intermedia” tiene una influencia menor.
- Se puede suponer que su influencia es despreciable a distancias cortas (30-70m).
- El método de cálculo de la 9613-2 es aplicable a suelos relativamente llanos o con una pendiente constante.

Absorción del terreno

- La ISO 9613-2 define tres zonas distintas sobre las que se especifica la atenuación del terreno:
- Zona cercana a la fuente: Va desde la fuente hasta una distancia de 30 veces su altura ($30 \cdot h_s$). Como valor máximo, se toma la distancia fuente – receptor (d_p).
- Zona cercana al receptor: Va desde el receptor hasta una distancia de 30 veces su altura ($30 \cdot h_r$). Como valor máximo, se toma la distancia fuente – receptor (d_p).
- Zona intermedia: Es la acotada entre los dos límites anteriores. Si $d_p < (30h_s + 30h_r)$, entonces las zonas cercanas a fuente y receptor se solapan y no hay zona intermedia.



Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

Absorción del terreno

- Las propiedades acústicas de cada región se definen con un factor de atenuación del terreno G . Se especifican 3 categorías:
 - Suelo reflejante ($G=0$): Pavimentos, asfalto, hormigón, agua o suelos mojados, hielo, roca y en general superficies con porosidad baja.
 - Suelo poroso ($G=1$): Hierba, vegetación, terreno labrado...
 - Suelo mixto ($0 < G < 1$): Si el suelo tiene componentes tanto reflejantes como porosos, el valor de G representa la fracción de terreno poroso.
- El cálculo de la atenuación es dependiente de la frecuencia y de las alturas y distancias fuente – receptor. Se debe realizar independientemente para las 3 zonas definidas (fuente A_s , intermedia A_m y receptor A_r), siendo:

$$A_{ground} = A_s + A_m + A_r$$

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

Absorción del terreno

Nominal midband frequency Hz	A_s or A_r ¹⁾ dB	A_m dB
63	- 1,5	- 3q ²⁾
125	- 1,5 + G × a'(h)	- 3q(1 - G _m)
250	- 1,5 + G × b'(h)	
500	- 1,5 + G × c'(h)	
1 000	- 1,5 + G × d'(h)	
2 000	- 1,5(1 - G)	
4 000	- 1,5(1 - G)	
8 000	- 1,5(1 - G)	

NOTES

$$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2}\right)$$

$$b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

$$c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

$$d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

1) For calculating A_s , take $G = G_s$ and $h = h_s$. For calculating A_r , take $G = G_r$ and $h = h_r$. See 7.3.1 for values of G for various ground surfaces.

2) $q = 0$ when $d_p \leq 30(h_s + h_r)$

$$q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p} \quad \text{when } d_p > 30(h_s + h_r)$$

where d_p is the source-to-receiver distance, in metres, projected onto the ground planes.

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

Absorción del terreno

- La norma proporciona una fórmula simplificada bajo ciertas condiciones:
 - Queremos predecir el nivel de presión sonora ponderado A (la fórmula no es dependiente de la frecuencia, sino que estima una atenuación para todo el espectro).
 - La propagación es por terreno poroso o por terreno mixto principalmente poroso.
 - No es aplicable a tonos puros (sólo para un ruido de banda ancha).

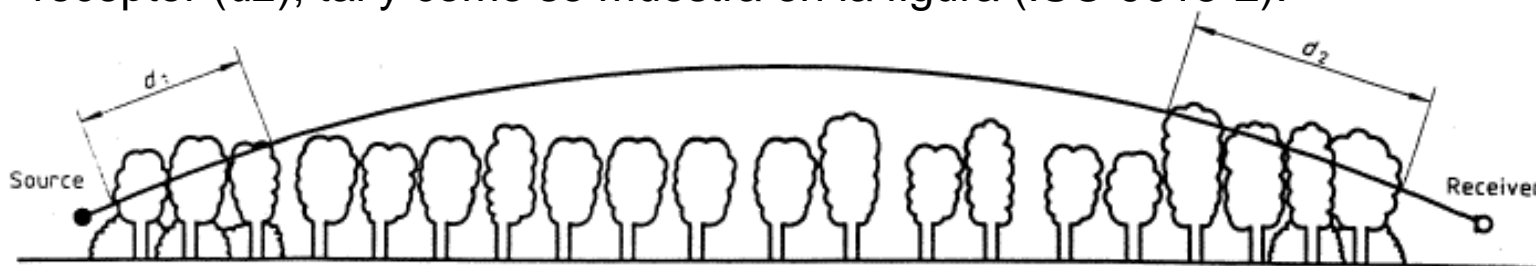
$$Att_{ground} = 4,8 - \left(\frac{2 \cdot h_m}{r} \right) \cdot \left(17 + \frac{300}{r} \right)$$

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

- Siendo:
 - hm = altura media de propagación del sonido
 - r = distancia fuente receptor

Absorción de la vegetación

- La influencia de la vegetación en los fenómenos de propagación a larga distancia genera conclusiones divergentes.
- No obstante, está generalmente aceptado que a distancias menores a 50m se puede despreciar y que ésta debe ser suficientemente densa como para impedir la visión a través de ella a distancias cortas.
- El uso de barreras acústicas basadas en vegetación (arboledas) se basa en una supuesta eficacia como “obstáculo”, no obstante se debe interpretar como la presencia de un terreno con mayor o menor grado de absorción.
- La atenuación se debe principalmente a las zonas cercanas a la fuente (d_1) y receptor (d_2), tal y como se muestra en la figura (ISO 9613-2):



NOTE — $d_1 = d_1 + d_2$

For calculating d_1 and d_2 , the curved path radius may be assumed to be 5 km.

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

Absorción de la vegetación

- El cálculo de $d1$ y $d2$ se puede realizar asumiendo una línea de propagación a 15° respecto el suelo hasta el punto en que se cruza con la cota superior de la vegetación.
- En función de la distancia $df = d1 + d2$ se da la atenuación de la zona con vegetación, para distintos ordenes de magnitud:

Propagation distance d_f m	Nominal midband frequency Hz							
	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
$10 \leq d_f \leq 20$	Attenuation, dB: 0 0		1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$	Attenuation, dB/m: 0,02 0,03		0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

- Ojo!: La ISO 9613-2 especifica estos valores para zonas con vegetación suficientemente densa! (debe impedir la visión a través de ella).
- Para distancias mayores a 200m, se debe usar la atenuación de 200m.

Absorción de la vegetación

- Además de la metodología descrita en la ISO, existe bibliografía que intenta parametrizar la absorción de distintos elementos de vegetación. A continuación se presentan unos ejemplos de formulación diversa:

- Atenuación para hierba, pradera, matorral y vegetación baja:

$$Att_{grass} = (0'18 \cdot \log(f) - 0'31) \cdot r$$

- Atenuación de bosques y arboledas (formulación de distintos autores):

$$Att_{forest} = (0'01 \cdot f^{1/3}) \cdot d$$

$$\Delta L_{bosque} = 2,34 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1/2} \cdot d \longrightarrow \text{Más pesimista}$$

$$A_{arb} = K_f \left(\frac{f}{1000} \right)^{1/3} \left(\frac{r_w}{100} \right) \leq 10 \longrightarrow$$

K_f = coeficiente de frondosidad, que toma valores de 6 a 10
 r_w = profundidad de la arboleda

- Como ejercicio, calcular la absorción para un bosque de 100m de espesor a 1KHz y a 250Hz y comparar los resultados con las 3 fórmulas

Reflexión: Limitaciones del método ISO 9613-2

- El medio de propagación es complejo de caracterizar y, por consiguiente, presenta una incertidumbre asociada. Para caracterizarlo, se asumen condiciones ideales y homogéneas que no suceden en un escenario real.
- La ISO proporciona la precisión del cálculo (ver Tabla) para un ruido de banda ancha bajo las siguientes condiciones:
 - Condiciones de propagación moderadamente favorables (DownWind).
 - No contempla fenómenos de sombras acústicas por gradientes.
 - No contempla reflexiones ni difracción en obstáculos o barreras.
 - Distancias de propagación hasta 1Km.
 - Para valores de octava o tonos puros la desviación puede ser mayor.
 - Estas desviaciones asumen que se han “escogido” parámetros representativos de la realidad (como G, condiciones atmosféricas....)

Height, h *)	Distance, d *)	
	$0 < d < 100$ m	$100 \text{ m} < d < 1\,000$ m
$0 < h < 5$ m	± 3 dB	± 3 dB
$5 \text{ m} < h < 30$ m	± 1 dB	± 3 dB
*) h is the mean height of the source and receiver. d is the distance between the source and receiver.		

Ref. [1]: ISO 9613-2 :1996(E)

Bibliografía

- Leo L. Beranek and István L. Vér, **Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications**. Edited by Leo L. Beranek and István L. Vér. © 1992 John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-471-61751-2
- L. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, **Fundamentos de Acústica**, 9ª Ed. LIMUSA. ISBN 968-18-2026-6.
- **ISO Standards Handbook – Acoustics, Vol. 1**. Ed 1995. ISBN 92-67-10221-4.
- **ISO 9613-1**: Acoustics: *Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. International Organization for Standardization. Genève 1996.
- **ISO 9613-2**: Acoustics: *Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General Method of Calculation*. International Organization for Standardization. Genève 1996.
- James P. Cowan **Handbook of Environmental Acoustics** ISBN 0-471-28584-6

Referencias

- [1] ISO 9613-2:1996(E): **Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General Method of Calculation.** International Organization for Standardization. Genève 1996.
- [2] Leo L. Beranek and István L. Vér, **Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications.** Edited by Leo L. Beranek and István L. Vér. © 1992 John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-471-61751-2.
- [3] Higini Arau Puchades, **ABC de la Acústica Arquitectónica.** © 1999 Grupo Editorial CEAC S.A. ISBN 84-329-2017-7.
- [4] J. Lamancusa, **Outdoor Sound Propagation.** Penn State 7/20/2009. Department of Mechanical and Nuclear Engineering.