SONIDO
Parte 1

Temario

El sonido como un movimiento oscilatorio armónico

Parámetros físicos de la oscilación y la propagación

Oscilaciones de presión - Intensidad y presión acústica

Representaciones gráficas de las oscilaciones

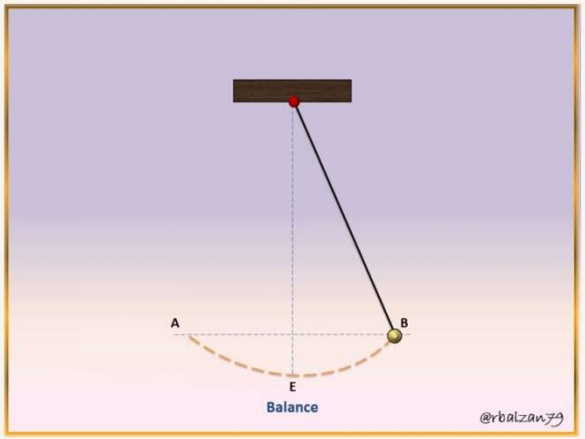
Oscilaciones Acústicas - Caracteres físicos y subjetivos

- Nivel de intensidad del sonido

Gráfico de nivel de intensidad

- Ley de masa
- Reducción sonora por ley de masa
- Ley de distancias

El sonido como un movimiento oscilatorio armónico



El péndulo como modelo de estudio

- **Analogía base:** Utiliza el péndulo para explicar el movimiento oscilatorio armónico.
- **Definición:** Es *movimiento* porque hay desplazamiento material, *oscilatorio* porque repite el mismo recorrido, y *armónico* porque se efectúa igual cantidad de veces en una unidad de tiempo.

Parámetros físicos del movimiento oscilatorio

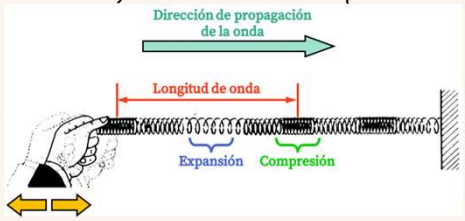
- **Amplitud (A):** Distancia desde el punto medio de equilibrio hasta la máxima separación (OP u OP').
- **Vibración u oscilación completa:** El recorrido completo de ida y vuelta (PP' y $P'P$).
- **Frecuencia (f):** Número de vibraciones u oscilaciones completas realizadas en un segundo.
- **Período (T):** Tiempo que tarda la partícula en realizar una oscilación completa.
- **Relación matemática:** La frecuencia y el período son inversamente proporcionales ($f = \frac{1}{T}$).

Comportamiento y propagación del sonido en un medio

- **Naturaleza del medio:** El sonido requiere un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) para propagarse mediante partículas vinculadas elásticamente; no puede transmitirse en el vacío.
- **Mecanismo de propagación:** La fuente emisora imprime un estado oscilatorio en las partículas contiguas, transmitiendo la perturbación en forma de vibraciones ordenadas a una velocidad determinada.

Clasificación de las ondas sonoras

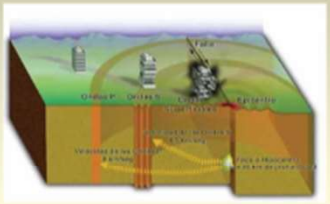
- **Mecánicas:** Perturban elementos materiales (partículas de aire, agua, etc.).
- **Longitudinales:** La dirección del movimiento de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda (a diferencia de las transversales en la superficie del agua).
- **Tridimensionales:** Se propagan en todas las direcciones y sentidos en el espacio a través de frentes de onda esféricos y concéntricos a partir de la fuente.

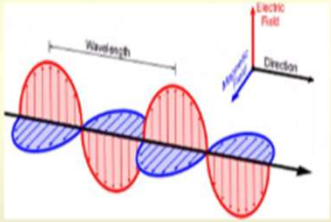


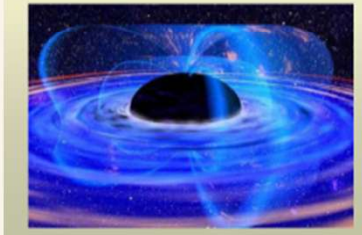




Clasificación de la Ondas

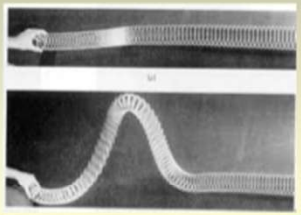


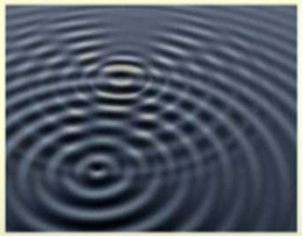




- ***Ondas mecánicas***: las ondas mecánicas necesitan un medio elástico para desplazarse (sólido, líquido o gaseoso) . Por ejemplo las ondas elásticas, las ondas sonoras, sísmicas.
- ***Ondas electromagnéticas***: estas se propagan por el espacio sin necesidad de un medio pudiendo, por tanto, propagarse en el vacío.
- ***Ondas gravitacionales***: son perturbaciones que alteran en sí mismo la geometría del espacio-tiempo.

Clasificación





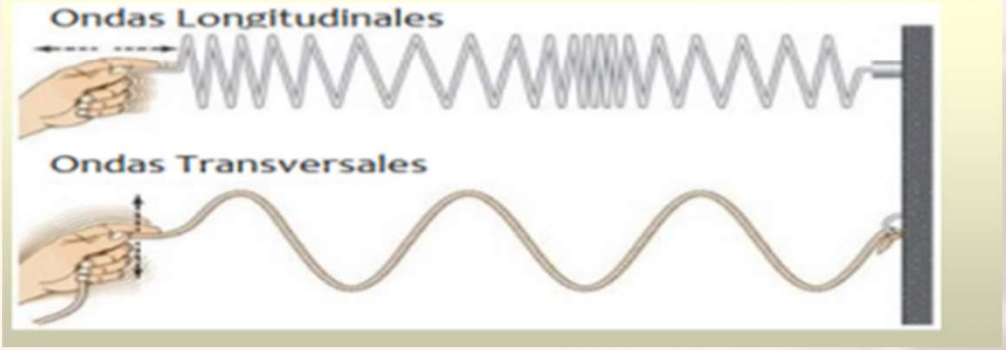


- ***Ondas unidimensionales***: son aquellas que se propagan en una sola dirección del espacio, como por ejemplo las ondas en los resortes o en las cuerdas de una guitarra.
- ***Ondas bidimensionales o superficiales***: son ondas que se propagan en dos direcciones, como por ejemplo una piedra al caer en un estanque.
- ***Ondas tridimensionales o esféricas***: son ondas que se propagan en tres direcciones, como las sonoras y las electromagnéticas.

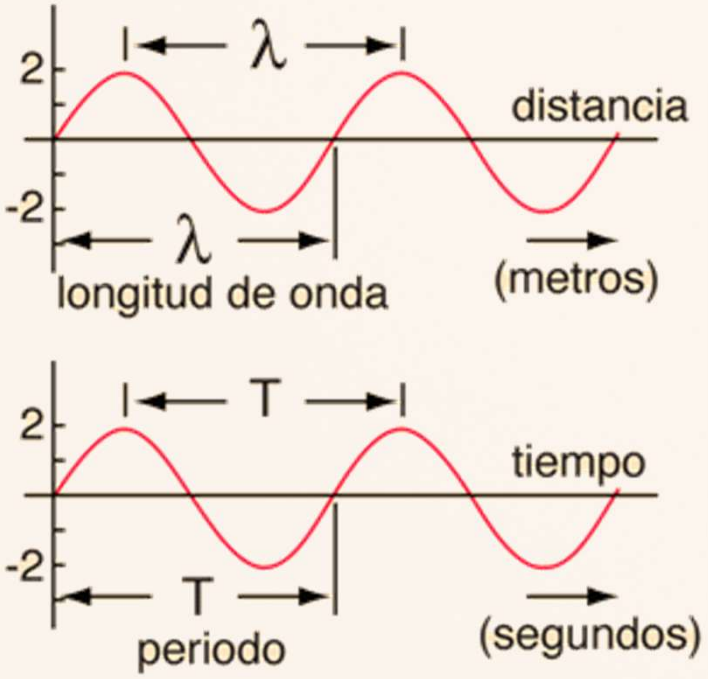
Ondas ~~Unidimensionales~~

ONDAS LONGITUDINALES: el movimiento de las partículas que transportan la onda es ***paralelo*** a la dirección de propagación de la onda.

ONDAS TRANSVERSALES: el movimiento de las partículas que transportan la onda es ***perpendicular*** a la dirección de propagación de la onda.



Parámetros físicos de la oscilación y la propagación



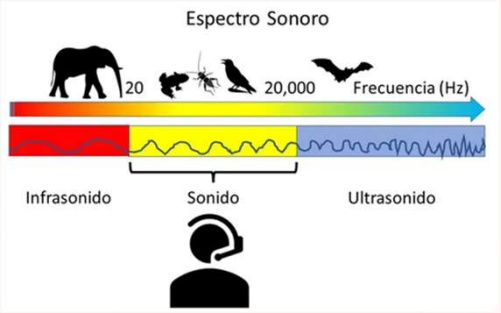
Parámetros fundamentales de la oscilación

- Período (T): Tiempo que dura una oscilación completa. Su unidad de medida es el segundo (s).

- Frecuencia (f): Número de ciclos, oscilaciones o vibraciones realizadas en la unidad de tiempo. Su unidad es el Hertz (Hz) o ciclos/segundo. Se relaciona con el período de forma inversa: $f = \frac{1}{T}$. (altura o tono)

- Amplitud (A): Máxima elongación o apartamiento de las partículas respecto de su posición media. Está directamente vinculada con la intensidad del sonido (volumen o nivel sonoro).

- Longitud de onda (λ): Espacio recorrido por la propagación a una velocidad v durante un tiempo correspondiente a un período (T). Se mide en unidades de longitud (m, cm, mm).



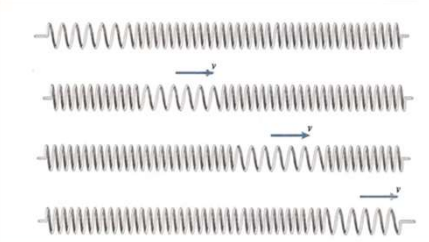
Parámetros físicos de la oscilación y la propagación

Timbre o color:

- **Definición:** Es la característica o cualidad del sonido que permite al oído distinguir dos sonidos producidos por fuentes distintas, aun cuando ambos posean la misma frecuencia (altura) e intensidad.
- **Causa física:** Depende de la **forma de la onda** sonora y de las oscilaciones secundarias que acompañan a la vibración principal (las cuales se originan por el comportamiento del aire en la caja de resonancia o el entorno del instrumento).

Parámetros de propagación y energía

- **Velocidad de propagación (v):** Rapidez con la que el estado oscilatorio alcanza los diversos puntos del medio. Se calcula como $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$.

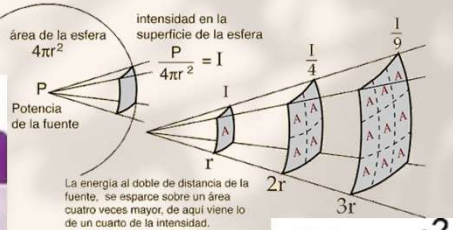


Medio	Velocidad
aire	334 m/seg
agua	1435 m/seg
acero	5560 m/seg
caucho	≅50 m/seg

- **Potencia (W_1):** Energía por unidad de tiempo empleada en producir la perturbación inicial. Se mide en Watts (W) y determina la amplitud de las oscilaciones.
- **Comportamiento con la distancia:** Al propagarse en frentes de onda esféricos concéntricos, la potencia por unidad de superficie ($\frac{W}{cm^2}$) decrece en proporción inversa al cuadrado de la distancia al origen ($S = 4\pi r^2$). Por ello, a mayor distancia el sonido se percibe más débil.

Diferencia Fundamental: Tono vs. Timbre

Característica	Tono (Altura)	Timbre (Color)
¿Qué es?	Define si un sonido es agudo o grave.	La cualidad que distingue las fuentes sonoras.
Depende de...	La frecuencia de la onda (Hz).	La cantidad e intensidad de los armónicos.
Ejemplo	La diferencia entre un Do bajo y un Do año.	La diferencia entre una flauta y un piano tocando el mismo Do.



$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Ejercicio 1: Parámetros del sonido en el aire y diseño de espacios

Se está diseñando un auditorio de música. Para analizar cómo interactúan las frecuencias graves en el espacio, se requiere calcular las dimensiones de la onda de una nota grave emitida por un instrumento.

Datos:

Frecuencia de la nota (f): 125 Hz
Velocidad del sonido en el aire (v):
334 m/s(según la tabla de la presentación)

Preguntas:

- ¿Cuál es el período (T) de esta onda sonora?
- ¿Cuál es la longitud de onda (λ)?
- ¿Por qué es importante considerar la longitud de onda al proyectar los muros o difusores de la sala?

Resolución:

- Cálculo del período (T):
- $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{125\ \mathrm{s}^{-1}} = 0{,}008$ s (8 ms)
- Cálculo de la longitud de onda (λ):
- $v = \lambda \cdot f \Longrightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{334\ \mathrm{m/s}}{125\ \mathrm{Hz}} = 2{,}67$ m
- Conclusión teórica: Una onda de $2{,}67$ m requiere obstáculos o elementos arquitectónicos de escala similar para ser dispersada o absorbida eficientemente; de lo contrario, la rodea (difracción) sin reflejarse adecuadamente.

Oscilaciones de presión - Intensidad y presión acústica

Oscilaciones de presión

- **Naturaleza en medios fluidos:** En el aire, las oscilaciones longitudinales de las partículas generan variaciones periódicas de compresión (condensación) y descompresión (descondensación) respecto de la presión atmosférica normal.
- **Definición de onda sonora:** La propagación del sonido en el aire se comprende como una transmisión de oscilaciones del valor de la presión media del fluido.
- **La amplitud de oscilaciones acústica:** Se mide en bar, milibar (mbar) o microbar (μbar).

Intensidad acústica (I)

- **Definición:** Es la energía sonora transmitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación.
- **Fórmula:** $I = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} = \frac{w}{\text{cm}^2}$.
- **Relación física:** Depende directamente de la amplitud (A) de la oscilación.

$$I = función\ (A^2)$$

- **Umbral de audición:** La menor intensidad que puede percibir el oído humano es $I = 10^{-1}\ \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2}$.

Presión acústica (p)

- **Definición:** Magnitud de las variaciones de presión respecto de la presión normal del aire a una distancia dada del origen de la perturbación.
- **Relación con la intensidad:** La presión acústica p en un punto del medio depende directamente de la intensidad I de la onda en ese lugar.

Nivel de intensidad del sonido

Intensidad sonora (I): Magnitud física pura definida como la energía (potencia) por unidad de tiempo y de área que atraviesa un frente de onda.

$$\text{Unidad: } \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2} \quad \left(\text{o } \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}\right)$$

Nivel de intensidad sonora (dB): Escala relativa y logarítmica diseñada para reflejar la respuesta perceptiva del **oído humano**.

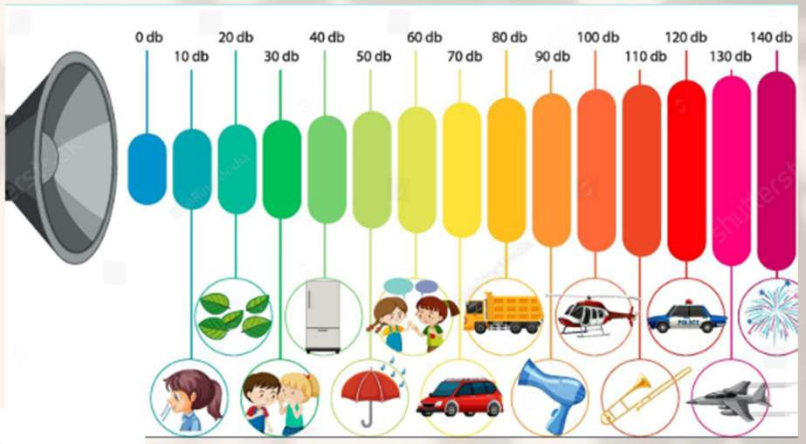
Justificación: El oído no responde de manera lineal a los incrementos de energía, por lo que se adopta una escala adimensional ajustada al rango audible humano

Expresión Matemática y Escala de Decibeles

- Fórmula base:
- $\text{dB} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$
- Umbral de audición (I_0): $\boldsymbol{I_0 = 10^{-16}}$ Watt/cm^2, que corresponde al punto cero de la escala: $\mathbf{0}$ dB.
- Umbral de dolor ($I_{\max}$): $\boldsymbol{I_{max} = 10^{-4}}$ Watt/cm^2, que equivale a 120 dB. Por encima de este nivel, la sensación se vuelve dolorosa y produce daño auditivo en poco tiempo

Nivel de intensidad del sonido percibido por el oído humano	
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto de rock
100 dB	Martillo eléctrico
90 dB	Tráfico congestionado
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50 a 60 dB	Aglomeración humana
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Sonido ambiente en el campo
0 dB	Umbral de audición

Nivel de intensidad del sonido



Puntos de Referencia y Valores Clave en la Escala (0 a 120 dB)

- 0 dB: Umbral mínimo audible (oído humano joven).
- 20 dB: Sonido débil (susurros, murmullo de hojas).
- 40 dB: Sonido normal (conversación normal, radio a volumen moderado).
- 60 dB: Sonido fuerte (conversación en voz alta).
- 80 dB: Nivel **peligroso** / muy fuerte (gritos, tránsito ruidoso). Exposiciones prolongadas conducen a la sordera progresiva.
- 100 dB: Sonido fortísimo (orquesta sinfónica, remachadora, talleres).
- 120 dB: Nivel **intolerable / límite de dolor** (motor de reacción a 5 m)

Ejercicio 2: Conversión de Intensidad Acústica a Nivel de Intensidad (dB)

En un taller mecánico contiguo a un estudio de arquitectura, un equipo de trabajo genera una intensidad sonora de $I = 10^{-10}$ W/cm^2.

Datos:

Intensidad medida (I): 10^{-1} W/cm^2
Umbral de audición (I_0): 10^{-16} W/cm^2

Preguntas:

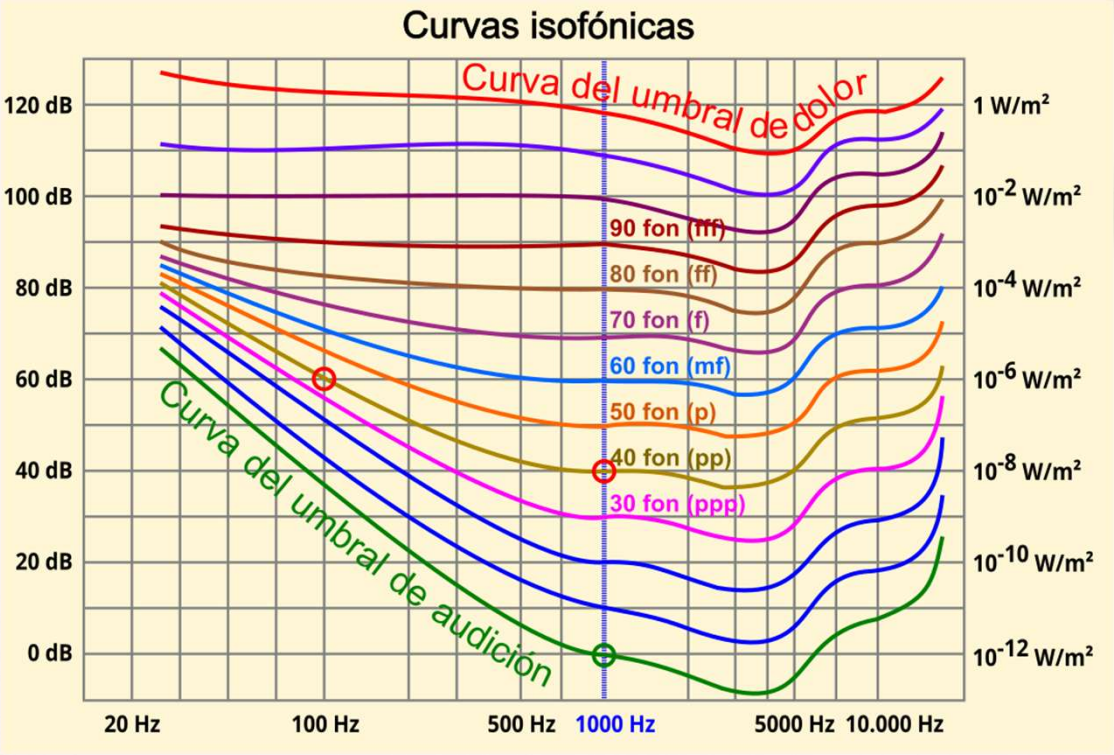
- Calcular el Nivel de Intensidad Sonora en decibeles (dB).
- Según la escala dada en la presentación, ¿en qué categoría se clasifica este nivel de ruido y qué impacto tiene para el trabajo intelectual?

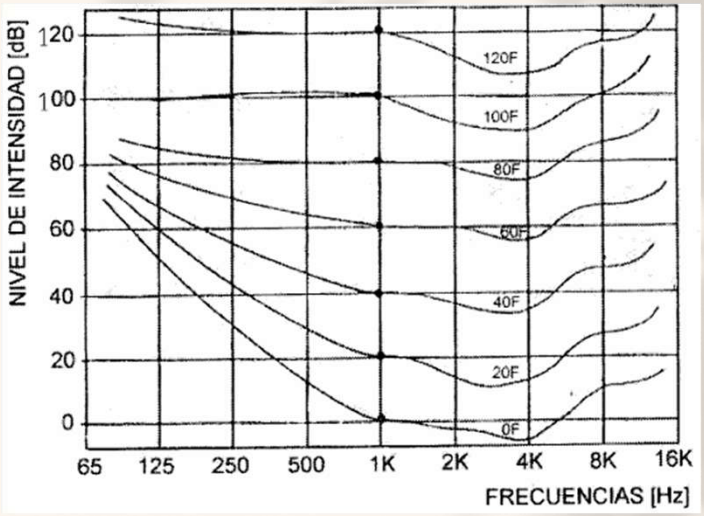
Resolución:

- Cálculo en decibeles (dB):
- $\text{dB} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$
- $\text{dB} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{10^{-10}}{10^{-16}}\right) = 10 \cdot \log_{10}(10^6) = 10 \cdot 6 = 60$ dB
- Conclusión teórica: Según los puntos de referencia de la presentación, 60 dB corresponde a un "Sonido fuerte" (conversación en voz alta). Supera el nivel deseable para tareas de oficina u oficinas de diseño (40 dB), por lo que requerirá un cerramiento aislante.

Sensibilidad Auditiva y la Unidad Fon

- La unidad **Decibel** (dB) solo mide la fuerza sonora percibida de forma equivalente a una frecuencia de referencia de 1000 Hz.
- El oído humano varía su sensibilidad según la frecuencia (es menos sensible a tonos graves y más sensible a tonos medios/agudos).
- Para evaluar el nivel de fuerza sonora a cualquier frecuencia se utiliza el **Fon**, definido experimentalmente a través de las curvas de igual sonoridad de **Fletcher y Munson**.





Ejercicio 3: Sensibilidad auditiva y curva frecuencia (Fones vs. dB)

Durante el análisis acústico de un aula, el sonómetro mide dos ruidos molestos provenientes del exterior:
Ruido A (grave): $f = 125$ Hz con un nivel de intensidad de 60 dB.
Ruido B (tono de referencia): $f = 1000$ Hz con un nivel de intensidad de 40 dB.

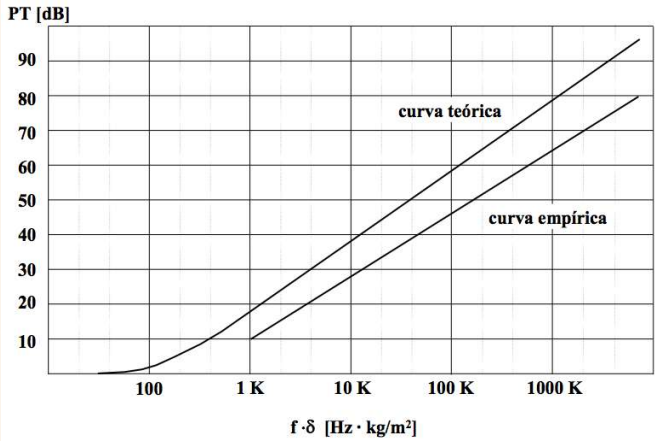
Preguntas:

- Utilizando las curvas de igual sonoridad de la presentación, hallar la sonoridad percibida en **Fones (F)** para el Ruido A (125 Hz a 60 dB).
- Determinar la sonoridad en **Fones (F)** para el Ruido B (1000 Hz a 40 dB).
- Compare los resultados en decibeles y en fones: ¿Cuál de los dos ruidos produce una mayor sensación de volumen en el oído humano?

Resolución:

- Análisis del Ruido A:
  - En el gráfico de la diapositiva *"Sensibilidad Auditiva y la Unidad Fon"*, buscamos en el eje horizontal la frecuencia 125 Hz y subimos verticalmente hasta los 60 dB.
  - Intersecta sensiblemente la curva marcada como 40F. Por lo tanto, un sonido de 60 dB a 125 Hz se percibe con la misma fuerza que 40 dB a 1000 Hz(20 Fones).
- Análisis del Ruido B:
  - A la frecuencia de referencia 1000 Hz (1K), el nivel en dB es idéntico al nivel en Fones. Por lo tanto, 40 dB equivalen a 40 Fones.
- Conclusión teórica:
  - Aunque físicamente el Ruido A transmite mayor energía (60 dB vs 40 dB), el oído humano es mucho menos sensible a frecuencias graves (125 Hz). En consecuencia, ~~ambos ruidos son percibidos por una persona con la misma sonoridad o fuerza física (40 Fones).~~

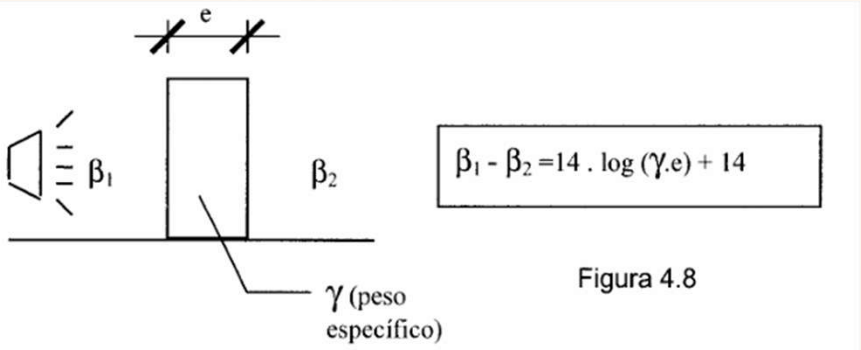
Gráfico de Nivel de Intensidad y Ley de Masa



- **Definición de Ley de Masa:** Establece que cuanto mayor es la masa de un material por unidad de volumen aparente (mayor densidad y menor porosidad), mayor es su capacidad de aislación acústica.
- **Parámetro de entrada (σ):** Se utiliza la **densidad superficial** ($\sigma = \gamma \cdot e$), donde γ es el ~~peso específico~~ densidad del material (Kg/m^3) y e es el espesor (m), expresada en Kg/m^2.
- **Uso del gráfico de Ley de Masas:**
- Se calcula el producto entre la frecuencia y la densidad superficial: $f \cdot \sigma$(expresado en Hz · Kg/m^2).
- Con este valor se ingresa por el eje horizontal (abscisas) de la gráfica.
- Se interseca la "curva" (línea recta en escala semi-logarítmica) y se obtiene en el eje vertical (ordenadas) la resistencia aérea acústica o valor de aislación equivalente en decibeles (R_i en dB).

- **Comportamiento según la frecuencia:** A mayor frecuencia (sonidos agudos), el valor $f \cdot \sigma$ aumenta, desplazando el punto hacia la derecha y obteniendo una mayor aislación en dB. Es decir, **los sonidos agudos son más fáciles de aislar que los sonidos graves**.

Reducción Sonora por Ley de Masa (Aislamiento Simple)



$\beta_1 - \beta_2 = 14 \cdot \log(\gamma \cdot e) + 14$

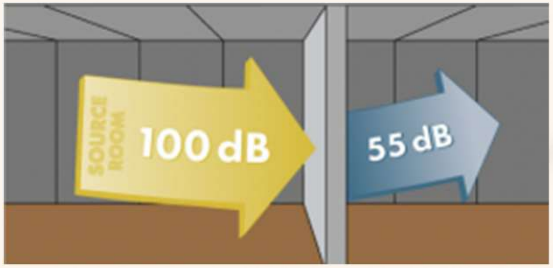
Figura 4.8

Donde aparecen los siguientes parámetros:

β_1 = sonido emitido en el local que posee la fuente emisora en db
β_2 = sonido que se percibe en el local contiguo separado por el material intermedio en db
γ = peso específico del material del cerramiento intermedio en Kg/m^3
e = espesor del material del cerramiento intermedio en m

- **Fórmula empírica de reducción sonora:** Para evaluar la diferencia de nivel sonoro entre el recinto emisor (β_1) y el receptor (β_2) divididos por un cerramiento simple de peso específico γ y espesor e, Nottoli presenta la expresión:
- $\beta_1 - \beta_2 = 14 \cdot \log_{10}(\gamma \cdot e) + 14$ [dB]

- **Ley del peso superficial (Regla práctica):**
- Para una densidad superficial $\sigma = 1$ Kg/m^2, se obtiene un valor de aislación de base de 15 dB.
- **Regla del duplicado:** Se ganan entre 4 dB y 6 dB de aislación por cada duplicación de la masa/peso superficial del cerramiento, o bien por cada duplicación de la frecuencia del sonido.
- **Alcance de la ley:** Aplica exclusivamente para la aislación de sonidos transmitidos por **vía aérea**. No debe aplicarse para ruidos de impacto o transmisión por vía sólida.





Ejercicio 4: Aislamiento acústico de un muro simple (Ley de Masa)

Se proyecta la separación entre dos dormitorios universitarios mediante un muro de ladrillos macizos con un espesor de $0{,}15$ m(15 cm).

Datos:

Nivel sonoro en la habitación emisora (β_1): 80 dB (música alta/ruido molesto)
Espesor del cerramiento (e): $0{,}15$ m
Peso específico del material (γ): 1800 kg/m^3

Fórmula:

$$\beta_1 - \beta_2 = 14 \cdot \log_{10}(\gamma \cdot e) + 14$$

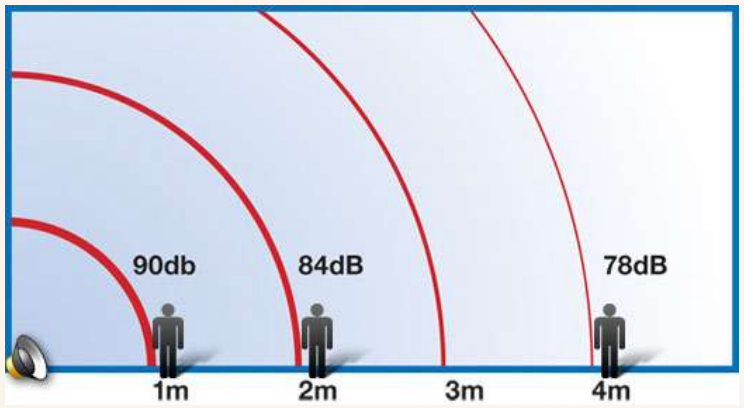
Preguntas:

- Calcular la masa superficial ($\sigma = \gamma \cdot e$) del muro.
- Obtener el nivel de reducción sonora / aislación del muro ($\beta_1 - \beta_2$).
- Determinar el nivel de ruido percibido en el dormitorio contiguo (β_2) y evaluar si cumple con el confort acústico nocturno (aproximadamente $30--35$ dB).

Resolución:

- **Masa superficial (σ):**
- $\sigma = \gamma \cdot e = 1800$ kg/m^3 $\cdot$ $0{,}15$ m $= 270$ kg/m^2
- **Pérdida por transmisión ($\beta_1 - \beta_2$):**
- Aislación (dB) $= 14 \cdot \log_{10}(270) + 14$
- Aislación (dB) $= 14 \cdot (2{,}431) + 14 = 34{,}04 + 14 = 48{,}04$ dB ≈ 48 dB
- **Nivel residual (β_2):**
- $\beta_2 = \beta_1 - 48$ dB $= 80$ dB $- 48$ dB $= 32$ dB
- **Conclusión teórica:** El nivel de 32 dB se aproxima a un ambiente tranquilo/conversación baja (cercano al rango de $20--30$ dB), resultando adecuado para el descanso residencial.

Ley de Distancias



- **Fundamento:** Todo sonido emitido al aire como onda esférica se atenúa gradualmente a medida que se aleja de la fuente debido al aumento de la superficie del frente de onda.

- **Expresión matemática de atenuación en** dB:
- $\Delta \text{dB} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{D}{D_1}\right)$
- (Donde Des la distancia mayor y D_1es la distancia menor respecto a la fuente sonora).

Comportamiento en la escala:

- **Distancia doble ($2D_1$):** $20 \cdot \log_{10}(2) \approx 6$ dB. Cada vez que se **duplica la distancia** a la fuente, el nivel sonoro disminuye 6 dB.

- **Distancia cuádruple ($4D_1$):** $20 \cdot \log_{10}(4) \approx 12$ dB. Al cuadruplicar la distancia, el nivel decrece 12 dB

Ejercicio 5: Propagación y Ley de Distancias en espacios abiertos

Un escenario al aire libre instalado en una plaza genera un nivel sonoro de 96 dB medido a 2 m de distancia de los altavoces. Se desea ubicar las primeras terrazas de un restaurante de modo que el ruido no supere los 72 dB.

Datos:

Nivel sonoro inicial en $D_1 = 2$ m: 96 dB
Nivel sonoro objetivo en D_2: 72 dB
Atenuación requerida (ΔdB): 96 dB − 72 dB = 24 dB

Fórmula:

$$\Delta\text{dB} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)$$

Preguntas:

- Utilizando la "Regla de la duplicación de distancia" (pérdida de 6 dB por cada duplicación), determinar intuitivamente la distancia necesaria.
- Verificar el resultado mediante la fórmula matemática exacta.

Resolución:

- Método por Regla Práctica (6 dB por duplicado):
  - A 2 m → 96 dB
  - A 4 m → 90 dB(se atenúan 6 dB)
  - A 8 m → 84 dB(se atenúan 12 dB)
  - A 16 m → 78 dB(se atenúan 18 dB)
  - A 32 m → 72 dB(se atenúan 24 dB)
- Verificación analítica:
- $24 = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{D_2}{2}\right) \Longrightarrow 1{,}2 = \log_{10}\left(\frac{D_2}{2}\right)$



- $10^{1,2} = \frac{D_2}{2} \Longrightarrow 15{,}85 \cdot 2 = D_2 \Longrightarrow D_2 = 31{,}7\text{ m} \approx 32\text{ m}$
- **Conclusión teórica:** Para asegurar un nivel máximo de 72 dB, las mesas exteriores deberán proyectarse a no menos de 32 metrosde la fuente emisora.