Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Tema 4: Acústica física IV

- Impedancia acústica.
- Intensidad acústica. Una única onda progresiva o regresiva.
- Intensidad acústica de ondas provenientes de varias fuentes.
- Ondas curvas

Impedancia acústica

- La relación entre presión acústica y velocidad del fluido se denomina **impedancia acústica específica** z.
- Resolviendo las ecuaciones resulta ser cte. Para ondas progresivas (+) o regresivas (-) planas presión y velocidad están en fase, o contra-fase, resp., luego:

$$\left.\begin{matrix}+\\-\end{matrix}\right\} u\langle x,t\rangle = \pm\frac{P\langle x,t\rangle}{\rho_{at}a} \;;\quad \text{Se define para onda - o +: } z=\rho_{at}a$$

$$\left.\begin{matrix} a = 341\text{m/s} \\ \left.\begin{matrix}\rho_{at} = \dfrac{P_{at}}{R_g T_{at}} \;;\; P_{at} = 1\text{atm} \\ T_{at} = 288{,}16\text{K}\end{matrix}\right\} \Rightarrow \rho_{at} = 1{,}218\text{kg/m}^3 \end{matrix}\right\} \rightarrow z = \rho_{at}a = 415\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

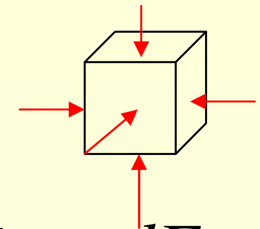
Ejercicio: P_{rms} = 20 Pa, próxima a sensación de dolor, Figura 1 del tema 1 $\Rightarrow$

$$u_{rms} = \frac{P_{rms}}{z} = \frac{20\text{kgm/s}^2\text{m}^2}{415\text{kg/m}^2\text{s}} = 0{,}048\text{m/s}$$

Impedancia acústica

- La impedancia acústica resulta útil para concebir los fenómenos que ocurren al cambiar la onda de medio de propagación (refracción y reflexión) pues cambia la impedancia.
- En especial, sirve para aplicar las condiciones de contorno, pues algunas se establecen en condiciones para la presión (extremo abierto) y otras en la velocidad (pared inmóvil).
- Veremos a continuación que facilita el cálculo de la intensidad acústica I.

Intensidad acústica. Una única onda progresiva o regresiva



- Es el flujo I de energía acústica por unidad de área transversal. $I = \dot{E} / dS = \left(dE / dt\right) / \left(dS\right)$
- Balance de energía de una masa de control adiabática: $dE = d\tau$. En el campo acústico continuamente se realiza una transformación reversible y exclusiva entre energía cinética e interna, por ello ponemos E, la energía completa.
- El trabajo diferencial $d\tau$ es la fuerza por el desplazamiento.
- La fuerza es el producto de la diferencia de presiones $(\boldsymbol{P}-P_{at})$ por el área dS. El desplazamiento es dx:

$$d\tau = \underbrace{\left(\boldsymbol{P} - P_{at}\right) dS}_{\text{Fuerza neta}} \times \underbrace{dx}_{\text{Despla-zamiento}} = PdSdx \Rightarrow I = \frac{\delta\tau}{dSdt} = \frac{Pdx}{dt} = Pu \left\{ \text{Variable temporal y espacialmente} \right.$$

Intensidad acústica. Una única onda progresiva o regresiva

Tomemos el valor medio en un periodo con x constante:

$$\left.\begin{array}{l} \left.\begin{array}{l} \overline{I} = \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_t^{t+T} I dt \\ I = Pu \end{array}\right\} \Rightarrow \overline{I} = \overline{Pu} \\ u = \pm\dfrac{P}{\rho_{at}a}\begin{cases} + : \text{progresiva} \\ - : \text{regresiva} \end{cases} \end{array}\right\} \rightarrow I = \pm\frac{P^2}{\rho_{at}a} \Rightarrow \overline{I} = \pm\frac{\overline{P^2}}{\rho_{at}a} \Rightarrow \left|\overline{I}\right| = \frac{1}{\rho_{at}a}\overline{P^2} = \frac{1}{\rho_{at}a}\left(P_{rms}\right)^2$$

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_t^{t+T} P^2 dt}$$

Resultado (ya no se pone más ¯ , ni signo):

$$\boxed{I = \frac{\left(P_{rms}\right)^2}{z};\ \ z = \rho_{at}a} \qquad (4)$$

No ponemos más el signo. En la realidad, con superposición de ondas, la intensidad es vectorial y aquí solo consideraremos su módulo.

Las mediciones indican que el oído humano produce percepciones de sonoridad relacionadas con esta magnitud, con ondas simples y complejas.

Intensidad acústica de ondas provenientes de varias fuentes

La superposición del campo acústico de varias fuentes con distintas direcciones, frecuencias, fases y amplitudes hace que se sume la presión instantánea. El sentido físico nos permite reconocer este fenómeno.

Si son coherentes, y de igual frecuencia y forma, se originan estacionarias, cancelándose parcialmente la perturbación de forma permanente en ciertas zonas y reforzándose en otras. **En este caso no se puede sumar la intensidad media, pues daría error.**

- En general, la presión eficaz o *rms* de la superposición de campos no es la suma de los *rms* de cada campo.
- Sin embargo, **Si las distintas fuentes no son coherentes entre sí (la fase de cada una de ellas es independiente y aleatoria) lo cual suele ocurrir con fuentes naturales:**

(Ya sin ¯)

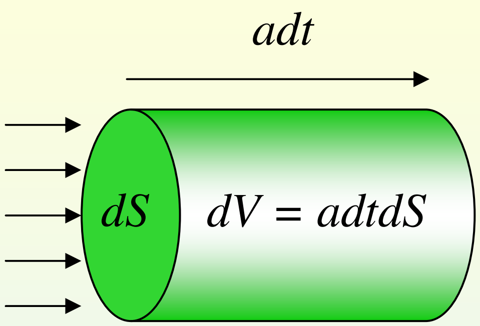
$$\boxed{I = \sum_{i=1}^{n} I_i} \qquad \boxed{I_i = \frac{\left(P_{rms}\right)_i^2}{\underbrace{\rho_{at} a}_{z}}} \qquad (5)$$

El oído humano no detecta la dirección de procedencia del sonido por la dirección del vector intensidad del sonido incidente en un oído, sino por otros mecanismos. La percepción de sonoridad responde bien con la suma de intensidades.

I se usa en cálculos y mediciones acústicas rutinarias, **luego al medir ha de evitarse la aparición de interferencias coherentes, p. e. proximidad a una pared.**

Densidad de energía

- Energía acústica por unidad de volumen w.
  - **Lo que entra por la base de un volumen fluido es el contenido en él mismo (si procede de varias direcciones, se suma aparte).**



Energía fluyendo hacia dentro de dV

$dE=IdtdS$

$$w=\frac{dE}{dV}=\frac{IdtdS}{adtdS}=\frac{I}{a}\ \text{Ec. (4)} \Rightarrow \frac{I}{a}=\boldsymbol{w}=\frac{(P_{rms})^2}{\rho_{at}a^2} \qquad (5\text{bis})$$

dV = volumen descrito por dS en un tiempo dt a la velocidad del sonido a

No ponemos más el símbolo ¯ para indicar valor medio

Ejemplo: Supongamos 1 millón de veces la presión del umbral de percepción, 20 Pa, que es cercano al umbral de dolor. Calculemos la densidad de energía:

$$w=\frac{(P_{rms})^2}{\rho_{at}a^2}=\frac{\left(10^6\times 20\times 10^{-6}\,\overbrace{\mathrm{kg}\times\mathrm{m}/(\mathrm{s}^2\times\mathrm{m}^2)}^{\mathrm{N}}\right)^2}{1\mathrm{kg/m^3}\,(340\mathrm{m/s})^2}=3{,}5\times 10^{-3}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}$$

Si afecta a 1.000 m³ → 3,5 J

Ondas curvas

- Las ondas esféricas y cilíndricas muestran un comportamiento en comparación con las planas:
  - Igual en lo que respecta a: la propagación de la misma forma de onda a la velocidad del sonido, solo que ahora va disminuyendo de amplitud al alejarse del centro.
  - ligeramente distinto: la velocidad no está en fase con la presión, apareciendo una *potencia reactiva* de valor medio nulo.
  - Esta diferencia con las ondas planas desaparece cuando la distancia a la fuente es mucho mayor que lo mayor entre λ y su tamaño $\rightarrow$ **campo lejano**.
- Las ondas curvas son un intermedio entre cilíndricas y esféricas o entre cilíndricas y planas.
- Por conservación de la energía (ley de la dispersión), la potencia *W* a una distancia r de la fuente en el campo lejano:

Esféricas: W $\propto IS \propto Ir^2 \Rightarrow I \propto r^{-2}$ Cilíndricas: W $\propto IS \propto Ir \Rightarrow I \propto r^{-1}$

Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Ondas curvas

La ec. (5) Nos indica que evaluando el valor cuadrático medio de las oscilaciones de presión se puede evaluar la intensidad de un conjunto de fuentes incoherentes entre, incluso si los frentes de onda son curvos, con la precaución de medir lo suficientemente lejos de ellas para que puedan ser consideradas localmente* planas.

------- Esto constituye la base del empleo de los sonómetros. ------------

* El planeta Tierra es esférico, pero localmente es plano (salvo perturbaciones orográficas)

Cuestiones de autoevaluación, tema 4

- ¿Es la impedancia acústica del agua mucho mayor que la del aire, asumiendo que en ella el sonido se propaga de igual manera?
- Expresiones de la intensidad acústica y de la densidad de energía acústica medias:
- Una fuente duplica la amplitud de la oscilación de presión que ocasiona en un punto del espacio, manteniendo la forma de onda estacionaria. ¿Se duplica la intensidad media resultante?
- Condiciones para que las intensidades medias se puedan sumar.
- Si un punto del espacio es alcanzado por dos ondas incoherentes entre sí y de igual P_{rms}, ¿la intensidad resultante es doble?
- En el caso anterior, ¿la densidad acústica de la zona es doble?
- Para obtener el comportamiento de una onda lo más parecido a una onda plana ¿interesa alejarse de la fuente?

Actividades propuestas, tema 4

- Usando la expresión de la intensidad instantánea y el campo de presión y velocidad instantáneos de un campo acústico plano, determine el campo de intensidad de onda progresiva.

Recordatorio y resumen, tema 4

- La teoría acústica aquí presentada se va orientando hacia casos fácilmente computables, válidos para entornos profesionales y que constituyen la base de la normativa técnica acústica.