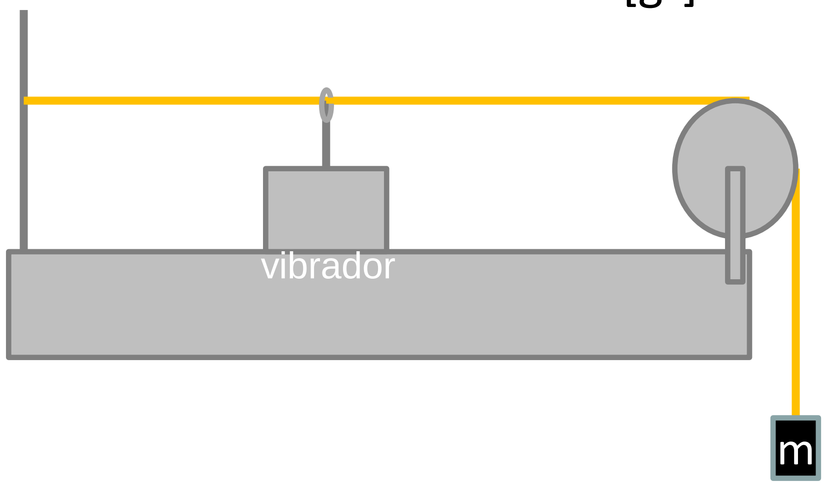
# Física III (sección 3) (230006-230010) Ondas, Óptica y Física Moderna

Profesor: M. Antonella Cid
Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad del Bío-Bío

**Carreras:** Ingeniería Civil Civil, Ingeniería Civil Mecánica, Ingeniería Civil Industrial

# Ejercicio

- Determine la densidad de la cuerda utilizando el montaje que se muestra en la figura si para una frecuencia de 50 [Hz] del vibrador, usted mide una longitud de onda para la onda estacionaria de 39.6 [cm] cuando ha suspendido de la cuerda una masa m de 200[gr].



# Ondas de Sonido

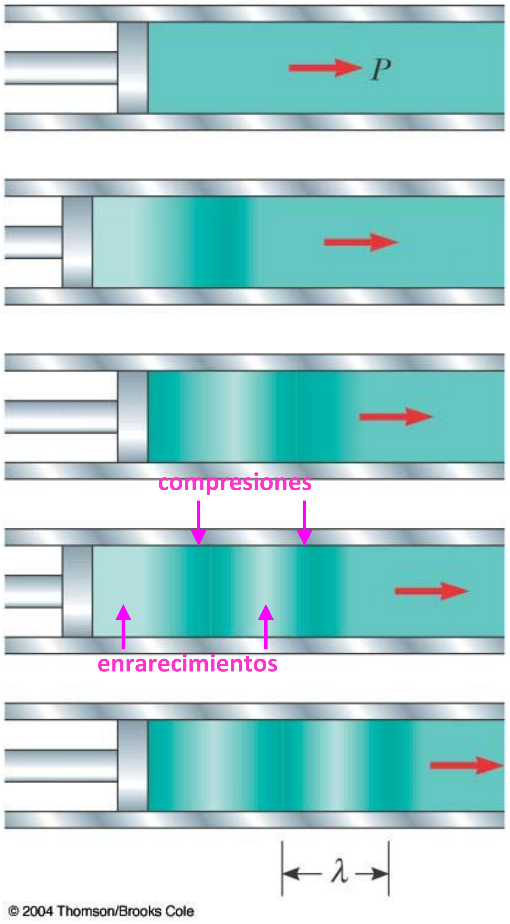

- La onda mecánica longitudinal más conocida es la onda de sonido. Los elementos de medio vibran (respecto de su posición de equilibrio) en la misma dirección en la cual se propaga la onda
- Las ondas sonoras se clasifican como:
  - Ondas infrasónicas: $f < 20$ [Hz]
  - Ondas audibles: $20$ [Hz] $< f < 20000$ [Hz]
  - Ondas ultrasónicas o supersónicas: $f > 20000$ [Hz]
- Las ondas sonoras viajan en 3 dimensiones aunque podemos simplificar la situación haciendo que éstas viajen en un tubo.

# Ondas de Sonido en un Tubo

Consideremos un **tubo largo** (para poder ignorar la posible reflexión de ondas) lleno de un **medio compresible**.

En uno de los extremos del tubo hay un émbolo (o pistón) que se mueve alternadamente.

Cuando el **émbolo** se mueve hacia la derecha e izquierda **comprime y enrarece** el medio respectivamente. Compresiones y enrarecimientos pueden considerarse como aumentos y disminuciones de la **densidad local** en relación a su valor promedio, respectivamente. Equivalentemente, compresiones y enrarecimientos pueden verse como aumentos y disminuciones de la **presión local.**

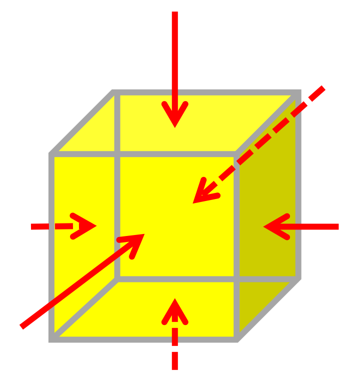


# Velocidad del Sonido

Para ondas longitudinales en fluidos la propiedad elástica que describe cómo responde el medio a cambios de presión con un cambio de volumen se denomina ***módulo volumétrico de elasticidad*** *B*

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V$$

El signo menos mantiene *B* positivo dado que el volumen disminuye con un aumento de presión.



La velocidad del sonido es dada en términos del módulo volumétrico y la densidad de volumen como:

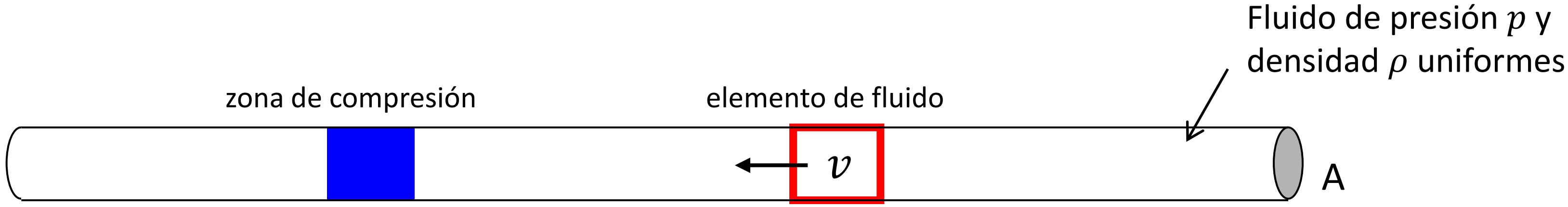
$$\boxed{v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}}$$

En sólidos el módulo volumétrico es reemplazado por el ***módulo de Young***

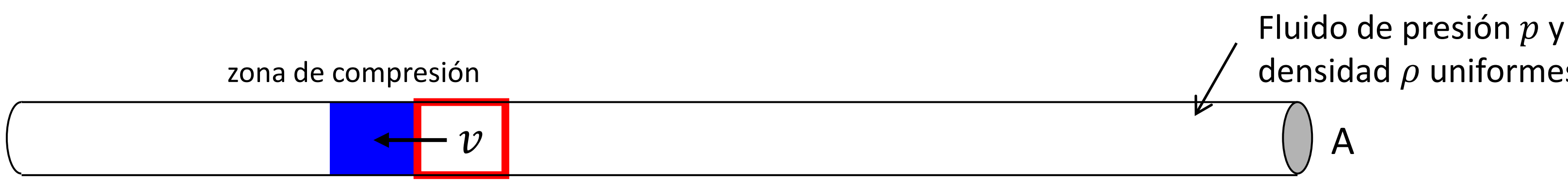
La velocidad del sonido también varía con la temperatura de acuerdo a la relación:

$v = 331\sqrt{1 + \frac{T_C}{273°[C]}}$. Para 20°[C] la velocidad del sonido es aprox. 343 [m/s]

# Velocidad del Sonido

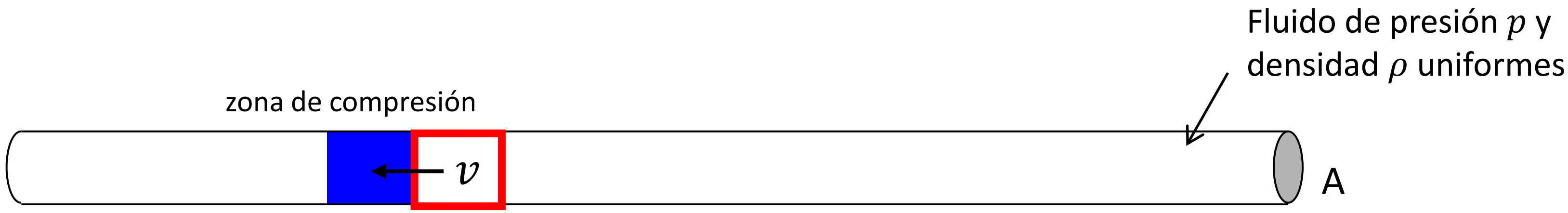



Una perturbación se propaga a la derecha en un tubo. En un sistema de referencia donde la perturbación permanece estacionaria, el fluido se mueve a la izquierda con rapidez $v$.

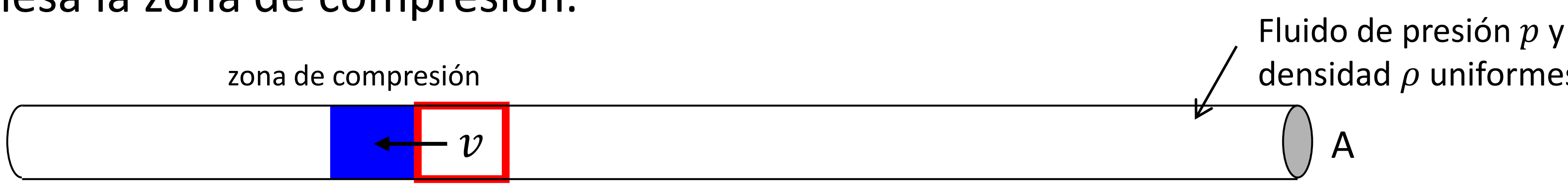



El borde izquierdo de un elemento de fluido entra a la zona de compresión en el tiempo $t$, mientras que el borde derecho lo hace en un tiempo $t + \Delta t$, donde $\Delta t = \Delta x / v$.

# Velocidad del Sonido

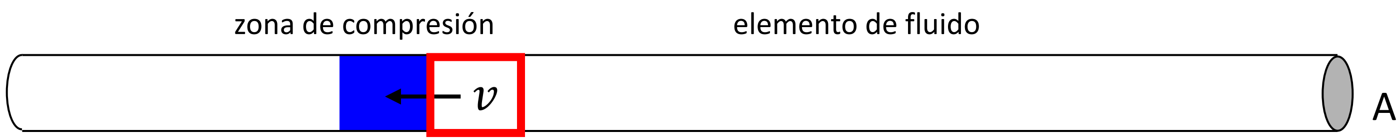



El borde izquierdo del elemento de fluido siente una presión $p + \Delta p$ mientras que el borde derecho siente una presión $p$. Debido a esta diferencia de presión, el elemento de fluido se comprime y su velocidad disminuye mientras atraviesa la zona de compresión.




En el borde izquierdo del elemento de fluido la rapidez es $v + \Delta v$ con $\Delta v$ negativo. Luego de salir de la zona de compresión el elemento se expande y aumenta su rapidez.

# Velocidad del Sonido




Aplicamos la II ley de Newton en el tiempo $\Delta t$ al elemento de fluido: $F = pA - (p + \Delta p)A = -\Delta pA$ donde la dirección positiva es a la izquierda.

Considerando que esta es la única fuerza que actúa sobre un elemento de fluido de largo $\Delta x$ y volumen $\Delta V = A\Delta x$ obtenemos: $F = -\Delta pA = ma = \rho A\Delta x \frac{\Delta v}{\Delta t}$, de donde notamos que $\rho v^2 = -\frac{\Delta p}{\Delta v} v$

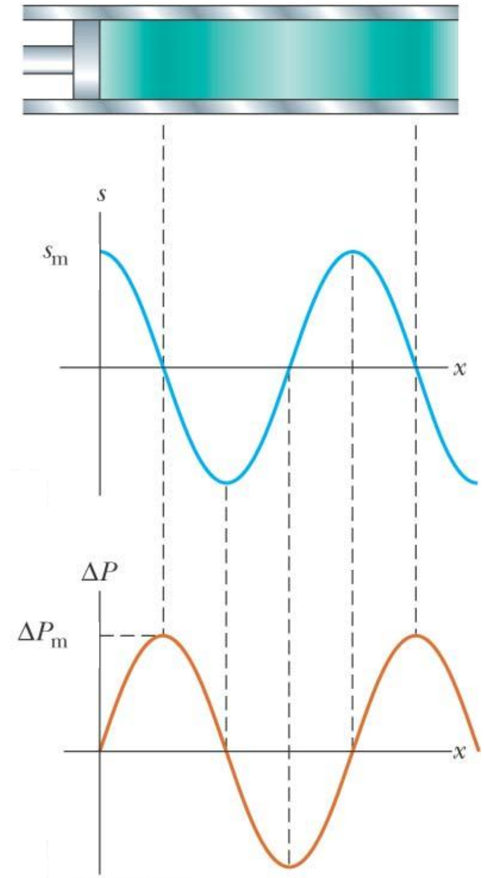
Durante intervalo de tiempo $\Delta t$ el volumen del elemento de fluido cambia debido a un cambio en el largo de este elemento, tenemos: $\frac{\Delta V}{V} = \frac{A\Delta v\Delta t}{Av\Delta t} = \frac{\Delta v}{v}$, dado que $B = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V$, finalmente obtenemos: $v^2 = \frac{B}{\rho}$

# Descripción de una onda de sonido

- Consideremos un tren continuo de compresiones y enrarecimientos que viajan a lo largo de un tubo lleno de fluido.
- Podemos enfocar nuestra atención en el desplazamiento de un elemento de medio $s(t, x)$ o en las variaciones periódicas de la presión en nuestra ubicación $\Delta p(t, x)$:

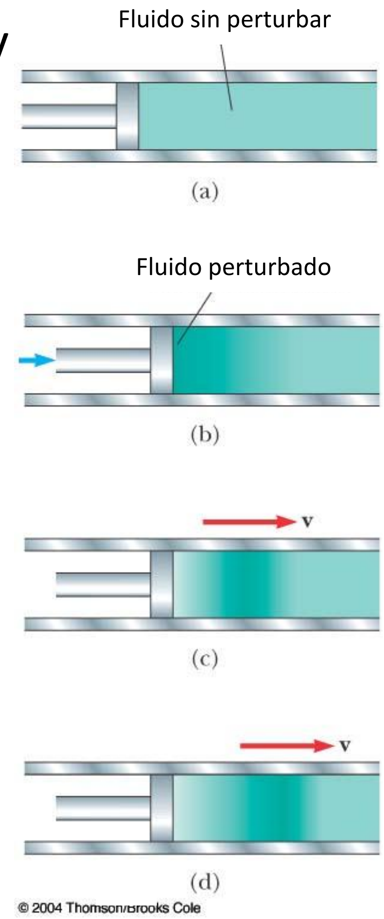
$$s(t, x) = s_m \cos(kx - \omega t)$$
$$\Delta p(t, x) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$$

- Ambas descripciones están desfasadas π/2 [rad], esto es, la variación de presión es máxima cuando el desplazamiento desde el equilibrio es cero y viceversa



# Descripción de una onda de sonido

Un elemento de medio experimentará cambios en la posición, y presión a medida que la onda de sonido se propaga en el fluido. Un cambio de volumen $\Delta V$ del elemento de medio se traduce en un cambio de presión $\Delta p$ en esa zona:




$$\Delta V = A\Delta s = A[s(x + \Delta x) - s(x)]$$

$$\Delta p = -B\frac{\Delta V}{V} = -B\frac{A\Delta s}{A\Delta x} = -B\frac{\Delta s}{\Delta x}$$

Tomando el limite para $\Delta x$ pequeño obtenemos: $\Delta p = -B\frac{\partial s}{\partial x}$.
Usando la función $s(t, x)$ descrita en la transparencia anterior, la relación entre $B$ y la rapidez de propagación en el medio $v = \frac{\omega}{k}$, obtenemos $\Delta p = \rho v\omega s_m \sin(kx - \omega t)$.
Comparando con la expresión para $\Delta p(t, x)$ en la transparencia anterior encontramos la relación: $\Delta p_m = \rho v\omega s_m$

# Potencia instantánea

Al viajar una onda sonora (o una onda de presión), cada elemento de fluido ejerce una fuerza sobre el elemento que está delante de él, la magnitud de esta fuerza es dada por: $F_{em} = A\Delta p = A\Delta p_m \sin(kx - \omega t)$

Por otra parte, el movimiento que experimenta un elemento de medio es dado por la función $s(t, x)$, luego la velocidad con la cual se mueve un elemento de medio estará dada por: $v_{em} = \frac{\partial s}{\partial t} = s_m \omega \sin(kx - \omega t)$

La potencia suministrada por un elemento de medio es dada en términos del trabajo mecánico $W$ como: $\wp = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F}_{em} \cdot \vec{v}_{em}$.
Luego debido a la relación entre $s_m$ y $\Delta p_m$ obtenemos:

$$\wp = A\omega\Delta p_m s_m[\sin(kx - \omega t)]^2 = A\rho v(\omega s_m)^2[\sin(kx - \omega t)]^2$$

# Potencia e Intensidad

Promediando la potencia para un ciclo de oscilación obtenemos:

$$\bar{\wp} = \frac{1}{T}\int_0^T \wp dt = \frac{1}{2}A\omega\Delta p_m s_m = \frac{1}{2}\frac{A}{\rho v}(\Delta p_m)^2 = \frac{1}{2}A\rho v(\omega s_m)^2$$

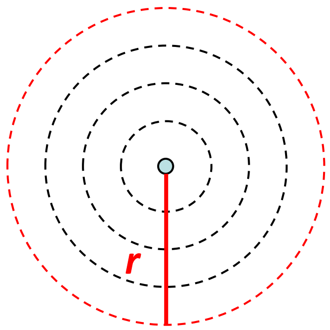
Al igual que en el caso de una onda en una cuerda (onda transversal), la potencia promedio depende del cuadrado de la amplitud, ya sea de la presión o del desplazamiento.

La ***intensidad*** de una onda o la potencia por unidad de área corresponde a la tasa a la cual la energía transportada por la onda pasa a través de un área $A$ perpendicular a la dirección de propagación de la onda

$$I = \frac{\bar{\wp}}{A} = \frac{1}{2}\omega\Delta p_m s_m = \frac{1}{2\rho v}(\Delta p_m)^2 = \frac{1}{2}\rho v(\omega s_m)^2$$

# Intensidad de una fuente puntual

Una fuente puntual emite ondas de sonido igualmente en todas direcciones




Frentes de onda esféricos emitidos por una fuente puntual. Los frentes de onda son proyectados como circunferencias en el plano de esta hoja

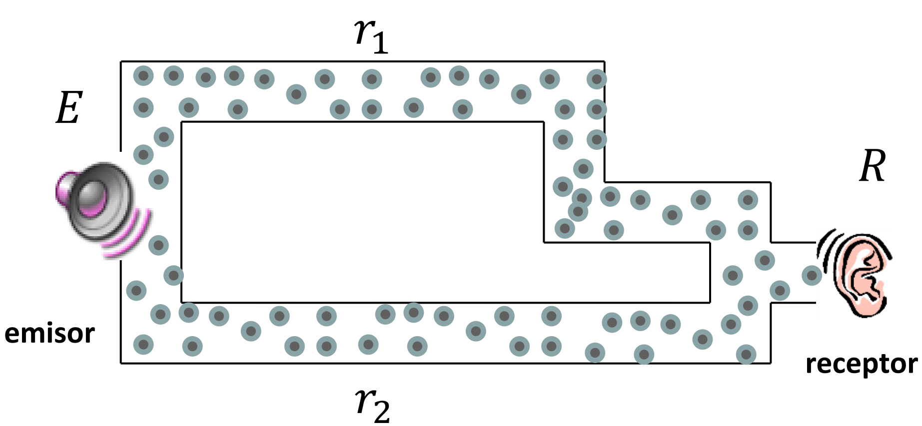
De la experiencia cotidiana sabemos que la intensidad de sonido decrece cuando nos alejamos de la fuente.

Dado que los frentes de onda son esferas, el área a una distancia $r$ de la fuente corresponderá a $4\pi r^2$, luego la intensidad toma la forma:

$$I = \frac{\overline{\wp}}{A} = \frac{\overline{\wp}}{4\pi r^2}$$

La intensidad de la fuente decrece con el cuadrado de la distancia que separa al observador de la fuente.

# Interferencia de ondas de sonido




Las ondas de sonido emitidas en $E$ siguen dos caminos diferentes. Una parte de la energía del sonido toma el camino de arriba $r_1$ mientras que la otra parte toma el camino de abajo $r_2$. Las ondas de sonido que llegan a $R$ pueden venir de cualquiera de estos dos caminos

Debido a la superposición de las ondas de sonido en $R$, las cuales siguen diferentes caminos, se presenta interferencia entre estas ondas de sonido.

Si la diferencia de camino es un múltiplo entero de $\lambda$ (longitud de onda) se presenta interferencia constructiva. Si la diferencia de camino es un múltiplo semi-entero de $\lambda$, se presenta interferencia destructiva.

Puede aparecer una diferencia de fase cuando dos ondas generadas por la misma fuente viajan por caminos diferentes de distinta longitud.

# Ejercicio

- Considere una fuente conectada a dos parlantes separados 2.3 [m]. Una persona está sentada frente a uno de los parlantes a 1.2 [m] de éste. Los parlantes emiten tonos puros de longitud $\lambda$ y las ondas están en fase al salir de los parlantes. ¿Para qué longitudes de onda la persona oirá un mínimo de intensidad?