A. Meseguer

1. Introducción

Los *ultrasonidos* son ondas longitudinales cuya *frecuencia* $\nu = 1/T$ (es decir, el inverso del *período* T) es superior a la que el oído humano puede percibir (entre los 10 kHz y los 20 kHz). En esta práctica trabajaremos con ultrasonidos de una frecuencia aproximada de $\nu = 40$ kHz, dado que su *longitud de onda* es del orden de $\lambda = 1\,\text{cm}$, lo cual facilita la experimentación en el laboratorio. Primero realizaremos experimentos de *propagación* en los que observaremos la variación de la fase de la onda con la posición y mediremos su velocidad de propagación partiendo de su longitud de onda, de su período y de un modelo termodinámico. Las ondas sonoras son ondas de presión que alteran la densidad local del gas en el cual se propagan. Dichas compresiones pueden ser lentas o rápidas, pudiéndose considerar en tales casos que el proceso es *isotérmico* ó *isoentrópico* (adiabático reversible), respectivamente. Finalmente, comprobaremos la *conservación de energía* de las ondas, mediante la medida de su amplitud, A, en función de la distancia, r, al foco emisor, y concluyendo que ambas magnitudes vienen relacionadas mediante una ley potencial de la forma $A \sim r^{\alpha}$, con $\alpha < 0$.

2. Ondas acústicas

Las ondas acústicas armónicas pueden generarse mediante un diapasón o un altavoz que vibra y que hace que las moléculas de aire próximas oscilen mediante un movimiento armónico simple, provocando así colisiones con otras moléculas vecinas y propagándose una perturbación de la presión y densidad del aire. Dicha perturbación se propaga según la expresión:

$$s(x,t) = A\,\sin(kx - \omega t),$$

siendo $k = 2\pi/\lambda$ el *número de onda*, y $\omega = 2\pi/T$ la *frecuencia angular*, los cuales determinan la periodicidad espacio-temporal y la velocidad de propagación de la onda ($v = \lambda/T$).

3. Modelo termodinámico para la propagación de una onda acústica

Las ondas sonoras se propagan con una velocidad que viene determinada por las propiedades físicas del medio. En el caso del aire, que puede considerarse gas ideal ($pV = nRT$)[1], la masa molecular es de $M = 28.8\,\text{g}\,\text{mol}^{-1}$, y su cociente de calores específicos es $\gamma = c_p/c_v = 1.4$.
Puede demostrarse que, si la propagación se realizase en condiciones isotermas, la velocidad de la onda sería

$$v_{\text{isot.}} = \sqrt{\frac{RT}{M}},$$

mientras que si la propagación se realizase de forma adiabática reversible, su velocidad sería

$$v_{\text{adiab.}} = \sqrt{\gamma\frac{RT}{M}}.$$

[1] $R = 8.314\,\text{J}\,\text{mol}^{-1}\,\text{K}^{-1}$

4. Dependencia de la amplitud de la onda con la distancia

Una onda sonora generada en un punto del espacio alrededor del cual no hay obstáculos físicos se propagará por igual en todas direcciones (simetría esférica). Esto quiere decir que, para un cierto instante de tiempo dado, la amplitud de la onda será la misma en todos aquellos puntos del espacio que se encuentren a la misma distancia del foco emisor (onda esférica). La conservación de la energía de la onda implica que su amplitud debe decrecer con la distancia al foco. En la práctica mediremos las amplitudes en funcion de la distancia al foco. De los datos registrados, y haciendo uso de un cambio de escala logarítmico y una simple regresión lineal, determinaremos el exponente α mencionado en la Introducción.

5. Sistema experimental, medidas y cálculos

En el experimento tendremos un *generador de funciones* (G) que conectaremos de forma simultánea (mediante una T-coaxial) a un *emisor* (E) y al Canal 1 de un osciloscopio (O). La señal emitida desde (E) será registrada por un Receptor (R), esta vez conectado al Canal 2 de (O). El experimento se realizará sobre un tablón en el que se ha dispuesto una regla milimétrica que permite la medida de distancias.

Parte 1: medida de T, λ y v

El osciloscopio nos permitirá determinar directamente el período de la señal enviada a (E) desde el generador. Para determinar el período T, utilizaremos la pantalla del osciloscopio, mirando la separación ℓ entre N máximos. De este modo, si A es la escala de tiempo del osciloscopio, tendremos: $T = A\,\ell/(N-1)$.
El error en la medida del período lo obtendríamos a partir del error en la distancia,

$$\frac{\Delta T}{T} = \pm\frac{\Delta \ell}{\ell},$$

de modo que estamos suponiendo que el osciloscopio es "*exacto*" en su escala de tiempos y que al contar lo hacemos correctamente.
Una vez alineados (E) y (R) sobre la recta milimétrica del tablón, desplazaremos (R) sobre dicha recta, observando así un retardo progresivo (desfasaje) de la señal registrada por (R). Dicho retardo se verá claramente sobre la pantalla del oscilospcopio. Cuando (R) se desplaza desde una posición inicial x_1 una longitud de onda λ hasta una posición final $x_2 = x_1 + \lambda$, la señal que antes se recibía con un retardo t_1 ahora se recibirá con un retardo t_2. Si el desfasaje neto resultante de ese desplazamiento es de 2π, entonces tendremos que $|x_1 - x_2| = \lambda$.
En efecto, la señal que enviamos al emisor es de la forma

$$y = A_0 \sin \omega t,$$

mientras que la señal registrada por el receptor, antes de desplazarlo, tiene un retardo debido a su propagación desde (E) hasta (R), es decir,

$$y = A_0 \sin \omega (t - t_1). \tag{1}$$

Cuando desplazamos el receptor, la señal llega ahora con un nuevo retardo t_2

$$y = A_0 \sin \omega (t - t_2). \tag{2}$$

Si al mover el receptor (o el emisor) volvemos a ver la misma señal en el osciloscopio, querrá decir que el desfasaje ha sido exactamente 2π, es decir:

$$2\pi = \omega(t_2 - t_1),$$

o, dicho de otro modo, la diferencia de retardos $t_2 - t_1$ es un *período* $T = 2\pi/\omega$. El desplazamiento representa

$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1) = vT = \lambda.$$

Para reducir el error en la medida, *conviene desplazar el receptor de* 20 *a* 40 *"ondas"*, de modo que, si entre x_2 y x_1 hay N ondas,

$$\lambda = \frac{x_2 - x_1}{N} .$$

El error sobre λ será:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{N}(\Delta x_2 - \Delta x_1)$$

Los valores de T y λ nos permitirán determinar la velocidad de propagación y su error asociado, el cual vendrá determinado por

$$\frac{\Delta v}{v} = \pm\left(\frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right).$$

La medida de la temperatura del laboratorio $\mathrm{T_{lab.}}$ y el cálculo de los modelos isotérmico y adiabático nos permitirá determinar cuál de los dos modelos proporciona una mejor aproximación a la velocidad de propagación medida experimentalmente.

Parte 2: dependencia de la amplitud con la distancia

La propagación de la onda y sus reflexiones en el receptor así como sobre la mesa de trabajo dan lugar a interferencias. En particular, las interferencias directas entre el emisor y el receptor generan ondas estacionarias que añaden fluctuaciones a la amplitud (unos pequeños máximos y mínimos) cada 4 mm aproximadamente. También se producen interferencias entre la radiación directa y las reflexiones sobre la mesa o las producidas por la presencia de objetos y/o personas cercanos.

Para una sucesión de posiciones x_i del receptor, determinaremos la tensión V entre crestas (máximos y mínimos) en función de la distancia al emisor. Tomando como origen la posición de (E), mediremos amplitudes en las siguientes abscisas:

$$\{x_i\} = \{6.0,\ 8.0,\ 10.0,\ 12.0,\ \ldots,\ 40.0\,\mathrm{cm}\}.$$

Sabiendo que la tensión decrecerá con la distancia según una ley potencial del tipo $V = \beta x^\alpha$, y transformando las abscisas x_i y ordenadas V_i registradas a escala logarítmica, obtendremos una dependencia lineal de la forma

$$y = a_0 + a_1 z,$$

con $y = \log V$ y $z = \log x$. Una regresión lineal nos proporcionará los valores de a_0 y a_1 y, por lo tanto, los valores de α y β.

Apellidos / Nombre / Grupo: ____________________ / ______________ / G___
Apellidos / Nombre / Grupo: ____________________ / ______________ / G___

Parte 1: medida de T, λ y v

MEDIDA DE T

- Núm. máximos utilizados en la pantalla (N): ___
- Escala utilizada (osciloscopio): ___ (unidades) ; Período: $\boxed{T = \quad \pm \quad \text{s}}$

MEDIDA DE λ Y v

- Núm. máximos (mínimos) registrados: ___
- Desplazamiento asociado: ___ $\pm$ ___ (cm)
- Longitud de onda: $\boxed{\lambda = \quad \pm \quad \text{mm}}$
- Velocidad: $\boxed{v = \quad \pm \quad \text{ms}^{-1}}$

MODELO TERMODINÁMICO DE PROPAGACIÓN

- Velocidad calculada con modelo isotérmico: $\boxed{v = \quad \pm \quad \text{ms}^{-1}}$
- Velocidad calculada con modelo adiabático: $\boxed{v = \quad \pm \quad \text{ms}^{-1}}$

El modelo representativo es el modelo: __________

Parte 2: dependencia de la amplitud A (mV) con la distancia x (cm)

Para una sucesión de posiciones x_i del receptor, determinaremos la tensión entre crestas (entre máximos y mínimos) en función de la distancia al emisor:

x (cm)	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0
A (mV)									

x (cm)	24.0	26.0	28.0	30.0	32.0	34.0	36.0	38.0	40.0
A (mV)									

Suponiendo que se cumple una ley *potencial* de la forma: $A = \beta x^\alpha$. Transformando amplitudes y distancias a escala logarítmica, la relación entre las variables tranformadas es *lineal*: $y = a_0 + a_1 z$.

Mediante una regresión lineal obtenemos:

$$\boxed{\alpha = \quad \pm \quad \text{y} \quad \beta = \quad \pm \quad \text{mV}}$$