

a) Tenemos un problema de efecto Doppler con reflexión, ya que el BIO emite una señal de frecuencia  $v=40$  MHz que llega a la ballena, rebota en ella y regresa de nuevo al BIO. En cuanto a la resolución del problema, podemos actuar como si el BIO emitiera una señal de frecuencia  $v$  que la ballena percibe como  $v'$ , y a continuación la ballena emitiera esa misma frecuencia  $v'$  que el BIO percibirá como  $v''$ . Comencemos entonces determinando la señal que percibirá la ballena, que como no sabemos si asciende o desciende consideraremos los dos casos. Si el BIO (fuente en reposo) emite  $v$  y la ballena (observador) percibe  $v'$  tendremos:

$$v' = v \frac{v - v_O}{v - v_F} = v \frac{v \pm v_b}{v}$$

A continuación la ballena es la fuente que emite esa misma señal que percibe, y el BIO es el observador que percibe  $v''$ . Volvemos a aplicar el efecto Doppler, teniendo en cuenta que nos cambiará el criterio de signos ya que el observador y la fuente se han intercambiado:

$$v'' = v' \frac{v - v_O}{v - v_F} = v \frac{v \pm v_b}{v} \cdot \frac{v}{v \mp v_b} = v \frac{v \pm v_b}{v \mp v_b}$$

Así pues tendremos:

$$v'' = v \frac{v + v_b}{v - v_b} \quad \text{si la ballena asciende}$$

$$v'' = v \frac{v - v_b}{v + v_b} \quad \text{si la ballena desciende}$$

Vemos aquí que la ballena está ascendiendo, ya que sólo en este caso la frecuencia percibida  $v'' = 40.125$  MHz es mayor que la emitida  $v=40$  MHz.

Sustituyendo los datos que conocemos:

$$v'' = v \frac{v + v_b}{v - v_b} \Rightarrow 40.125 = 40 \frac{1500 + v_b}{1500 - v_b} \Rightarrow 1504.6875 - 1.003425v_b = 1500 + v_b$$

$$v_b = \frac{1504.6875 - 1500}{1 + 1.003425} = 2.34 \text{ m/s}$$

$$\underline{v_b = 2.34 \text{ m/s}}$$

b)  $80 \text{ ms} = 0.08 \text{ s}$  es el tiempo que tarda el sonido en bajar hasta la ballena y subir de nuevo hasta el barco. En ese tiempo tendremos que tener en cuenta que la ballena también se mueve, y que recorre un espacio hacia arriba de:

$$v_b = \frac{y_b}{t} \Rightarrow y_b = v_b t = 2.34 \cdot 0.08 = 0.1872 \text{ m}$$

Por tanto, cuando el barco emite el pulso la ballena se encuentra a una profundidad que llamemos  $h_b$ . Sin embargo, cuando el sonido llega a la ballena ésta habrá recorrido hacia arriba la mitad de la cantidad determinada anteriormente. Por tanto, el sonido, en  $0.08 \text{ s}$  realmente recorre  $(h_b - 0.0936)$ , dos veces, ya que tiene que bajar y subir. De este modo, para el sonido:

$$v = \frac{y}{t} \Rightarrow 1500 = \frac{2(h_b - 0.0936)}{0.08} \Rightarrow 120 = 2h_b - 0.1872 \Rightarrow h_b = 60.09 \text{ m}$$

$$\underline{h_b = 60.09 \text{ m}}$$

c) Cuando los pulsos llegan de nuevo al BIO la ballena ha recorrido hacia arriba 0.1872 m, de modo que la nueva distancia será:

$$h'_b = h_b - 0.1872 = 60.09 - 0.1872 = 59.91 \text{ m}$$

$$\underline{h'_b = 59.91 \text{ m}}$$

d) La frecuencia que percibe la ballena es lo que hemos denominado  $v'$ :

$$v' = v \frac{v + v_b}{v} = 40 \frac{1500 + 2.34}{1500} = 40.062 \text{ MHz}$$

$$\underline{v' = 40.062 \text{ MHz}}$$