

## Efecto Doppler

El efecto Doppler es el cambio aparente en la frecuencia de una onda cuando existe movimiento relativo entre la fuente emisora y el receptor.

Este fenómeno ocurre, por ejemplo, cuando una ambulancia se acerca y luego se aleja: mientras se acerca, el sonido se percibe más agudo; cuando se aleja, se percibe más grave.

En las ondas sonoras, este cambio se debe a que el movimiento modifica la forma en que los frentes de onda llegan al receptor.

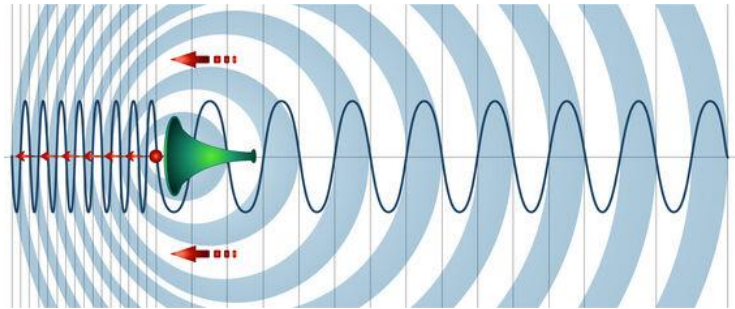
### 1. Fuente en movimiento y receptor en reposo

Supongamos primero que la fuente sonora se mueve y el receptor permanece en reposo.

Cuando la fuente se acerca al receptor, los frentes de onda se comprimen delante de la fuente. Es decir, llegan más juntos al receptor. Por eso, la longitud de onda aparente disminuye y la frecuencia percibida aumenta.

Cuando la fuente se aleja del receptor, los frentes de onda quedan más separados detrás de la fuente. Entonces, la longitud de onda aparente aumenta y la frecuencia percibida disminuye.

La velocidad de propagación del sonido en el medio no cambia. Lo que cambia es la longitud de onda aparente que recibe el observador.



Si la fuente se acerca:

$$\lambda' < \lambda$$

Como la rapidez del sonido en el medio se mantiene constante:

$$v = \lambda f = \lambda' f'$$

si la longitud de onda disminuye, la frecuencia percibida aumenta:

$$f' > f$$

Supongamos que la fuente emite ondas con período  $T$ . Eso significa que emite un frente de onda cada  $T$  segundos. Si la fuente estuviera quieta, durante ese tiempo  $T$ , la onda avanzaría una distancia:

$$\lambda = vT$$

Esa sería la longitud de onda normal.

Pero ahora la fuente se mueve hacia el receptor con velocidad  $v_f$ . Mientras el primer frente de onda avanza, la fuente también avanza.

En el mismo tiempo  $T$ :

$$\begin{aligned} \text{la onda avanza } vT \\ \text{la fuente avanza } v_f T \end{aligned}$$

Entonces, delante de la fuente, el nuevo frente de onda se emite desde una posición más adelantada. Por eso, la distancia entre frentes de onda no es  $vT$ , sino:

$$\lambda' = vT - v_f T = \lambda' = T(v - v_f). \text{ Como } T = \frac{1}{f} \text{ resulta } \lambda' = \frac{v - v_f}{f}$$

La frecuencia percibida por el receptor será:

$$f' = \frac{v}{\lambda'}$$

Reemplazando:

$$f' = \frac{v}{\frac{v - v_f}{f}}$$

$$f' = f \cdot \frac{v}{v - v_f}$$

donde:

- $f'$  es la frecuencia percibida;
- $f$  es la frecuencia emitida por la fuente;
- $v$  es la rapidez del sonido en el medio;
- $v_f$  es la rapidez de la fuente.

Análogamente, cuando la fuente se aleja, cada frente de onda se emite desde una posición cada vez más lejana respecto del receptor. Por eso, los frentes de onda llegan más separados. Entonces:

$$\lambda' > \lambda$$

Si la longitud de onda aumenta, la frecuencia percibida disminuye:

$$f' < f$$

En este caso, la frecuencia percibida es:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v + v_f}$$

Por lo tanto, para una fuente en movimiento y un receptor en reposo:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v \mp v_f}$$

donde se usa:

el signo menos si la fuente se acerca al receptor;

el signo más si la fuente se aleja del receptor.

## 2. Fuente en reposo y receptor en movimiento

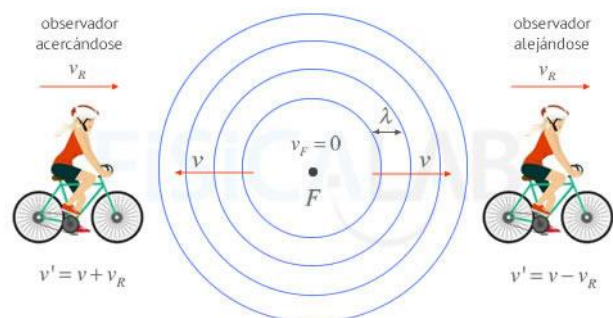
Ahora supongamos que la fuente sonora está quieta y el receptor se mueve.

En este caso, la fuente emite frentes de onda regularmente, siempre separados por la misma longitud de onda.

La diferencia está en cómo el receptor encuentra esos frentes de onda.

Si el receptor se acerca a la fuente, se encuentra con los frentes de onda más rápidamente. Por eso, recibe más ondas por segundo y percibe una frecuencia mayor.

Si el receptor se aleja de la fuente, los frentes de onda le llegan más espaciados en el tiempo. Por eso, recibe menos ondas por segundo y percibe una frecuencia menor.



Cuando el receptor se acerca a la fuente, la velocidad relativa con la que encuentra los frentes de onda es  $v + v_r$ , por lo tanto:

$$f' = \frac{v + v_r}{\lambda}$$

Como  $\lambda = \frac{v}{f}$ , entonces:

$$f' = \frac{v + v_r}{v} f$$

$$f' = f \cdot \frac{v + v_r}{v}$$

Por lo tanto, cuando el receptor se acerca a la fuente:

$$f' = f \cdot \frac{v + v_r}{v}$$

Análogamente, si el receptor se aleja de la fuente, los frentes de onda le llegan con menor frecuencia. En ese caso:

$$f' = f \cdot \frac{v - v_r}{v}$$

En general, para una fuente en reposo y un receptor en movimiento:

$$f' = f \cdot \frac{v \pm v_r}{v}$$

donde se usa:

- el signo **más** si el receptor se acerca a la fuente;
- el signo **menos** si el receptor se aleja de la fuente.

### 3. Caso general: fuente y receptor en movimiento

Cuando tanto la fuente como el receptor pueden estar en movimiento, se combinan los dos efectos anteriores. La expresión general para el efecto Doppler en ondas sonoras es:

$$f' = f \cdot \frac{v \pm v_r}{v \mp v_f}$$

donde:

- $f'$  es la frecuencia percibida por el receptor;
- $f$  es la frecuencia emitida por la fuente;
- $v$  es la rapidez del sonido en el medio;
- $v_r$  es la rapidez del receptor;
- $v_f$  es la rapidez de la fuente.

Para elegir los signos:

En el **numerador**, que corresponde al movimiento del receptor:

- se usa **más** si el receptor se acerca a la fuente;
- se usa **menos** si el receptor se aleja de la fuente.

En el **denominador**, que corresponde al movimiento de la fuente:

- se usa **menos** si la fuente se acerca al receptor;
- se usa **más** si la fuente se aleja del receptor.

### Conclusión general del efecto Doppler

El efecto Doppler aparece cuando hay movimiento relativo entre una fuente que emite ondas y un receptor que las recibe.

Cuando la fuente y el receptor se acercan, los frentes de onda llegan más juntos al receptor. Por eso, la longitud de onda observada disminuye y la frecuencia observada aumenta. En el caso del sonido, esto se percibe como un sonido más agudo.

Cuando la fuente y el receptor se alejan, los frentes de onda llegan más separados. Entonces, la longitud de onda observada aumenta y la frecuencia observada disminuye. En el caso del sonido, esto se percibe como un sonido más grave.

En resumen:

Si se acercan:  $\lambda \downarrow f \uparrow$

Si se alejan:  $\lambda \uparrow f \downarrow$

Lo importante no es solamente quién se mueve, sino si la distancia entre fuente y receptor disminuye o aumenta.

Si la distancia entre la fuente y el receptor disminuye, la frecuencia observada aumenta. En sonido, eso se percibe como un sonido más agudo.

Si la distancia entre la fuente y el receptor aumenta, la frecuencia observada disminuye. En sonido, eso se percibe como un sonido más grave.