

Fundamentos del efecto Doppler en el sonido

Prof. Sandra Milena Agudelo González



Introducción al Efecto Doppler

¿Qué es el efecto Doppler?

El **efecto Doppler** describe cómo cambia la frecuencia (o tono) de una onda cuando hay movimiento relativo entre la fuente de la onda y el observador.

El **efecto Doppler** tiene aplicación en diferentes áreas del conocimiento, como:

- En el **sonido**, explica por qué el tono de una sirena cambia al pasar cerca.
- En **astronomía**, se utiliza para medir la velocidad de las galaxias (corrimiento al rojo o al azul).
- En **medicina**, se aplica en ecografías Doppler para estudiar el flujo sanguíneo.
- En **tránsito y radares**, permite calcular la velocidad de un vehículo mediante ondas de radio.

Fundamento Conceptual

Cuando una fuente sonora o un observador se mueven, el número de frentes de onda que llegan por segundo varía, modificando la **frecuencia aparente** percibida.

Concepto básico

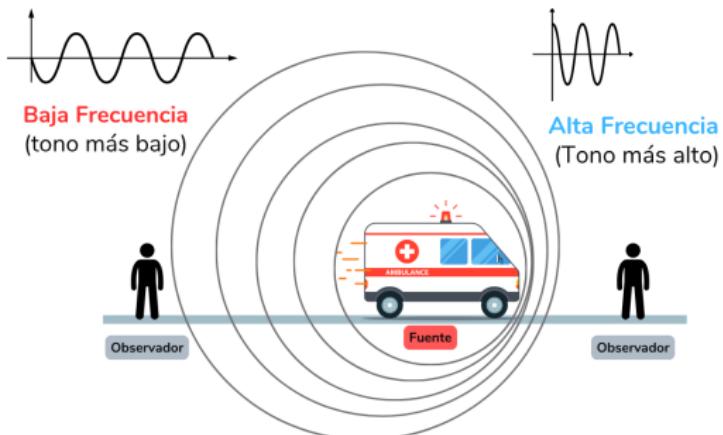


Figura 1. Compresión y expansión de las ondas sonoras al moverse una ambulancia. Fuente: Autor

Recordatorio:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad v = \lambda \cdot f$$

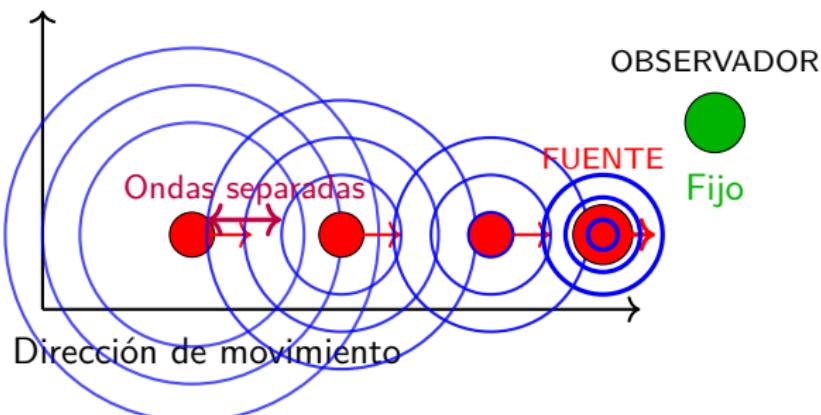
donde:

- f : frecuencia
- λ : longitud de onda
- v : velocidad del sonido
- Si la fuente y el observador se acercan, la frecuencia percibida aumenta y la longitud de onda aparente disminuye.
- Si se alejan, la frecuencia percibida disminuye y la longitud de onda aparente aumenta.

Nota

El efecto Doppler no cambia la frecuencia emitida real, sino cómo la percibe el observador debido al movimiento relativo.

Introducción al Efecto Doppler



¿Por qué ocurre?

El sonido se propaga mediante **frentes de onda**. Cuando la fuente está quieta, estos forman círculos concéntricos equidistantes. Pero si la fuente se mueve, los frentes se **comprimen** en la dirección del movimiento y se **expanden** en sentido contrario.

Esto hace que:

- Hacia donde se mueve la fuente, la longitud de onda se acorte y la frecuencia percibida sea mayor (sonido más agudo).
- En la parte opuesta, las ondas se estiren, la longitud de onda aumente y la frecuencia percibida sea menor (sonido más grave).

Este cambio aparente en la frecuencia es lo que se conoce como **efecto Doppler**.

Deducción matemática del efecto Doppler

Comprendiendo las fórmulas detrás del cambio de frecuencia

A continuación, analizaremos paso a paso cómo se obtiene la expresión matemática general del efecto Doppler, considerando diferentes casos de movimiento entre la fuente y el observador.

Notación a utilizar

Nota

A continuación se presenta la notación propia del efecto Doppler. Cabe resaltar que el **observador** somos nosotros, quienes percibimos el sonido, y la **fuente** es el cuerpo que emite la señal, por ejemplo un instrumento musical que emite un tono constante.

Notación a utilizar

- f_0 : frecuencia emitida por la fuente.
- f' : frecuencia percibida por el observador.
- v : velocidad de propagación de la onda en el medio (para el sonido en aire, típicamente $v \approx 343 \text{ m/s}$ a 20°C).
- v_s : velocidad de la fuente ($v_s > 0$ si la fuente **se aleja** del observador).
- v_0 : velocidad del observador ($v_0 > 0$ si el observador **se acerca** a la fuente).
- λ : Longitud de onda.

Caso 1: Observador en movimiento y fuente en reposo

Contexto

Imaginemos que nos acercamos a la fuente. Las ondas emitidas tienen una longitud de onda fija, pero como nos movemos hacia ellas, la frecuencia con la que las recibimos cambia.

Si la fuente está en reposo, la longitud de onda en el medio es constante y está dada por:

$$\lambda = \frac{v}{f_0}.$$

Esa longitud de onda será la misma que el observador percibe, pero la frecuencia cambiará porque el observador se mueve con respecto al medio.

Idea clave

La frecuencia percibida depende de la **velocidad relativa** con la que el observador intercepta los frentes de onda.

Caso 1: Observador en movimiento y fuente en reposo

Por tanto, la velocidad relativa con que las ondas llegan al observador es:

$$v' = v + v_0$$

donde $v_0 > 0$ si el observador se acerca (recibe más frentes por segundo) y $v_0 < 0$ si se aleja (recibe menos).

Sabemos que la velocidad de propagación de una onda es el producto de su frecuencia por su longitud de onda:

$$v = f \lambda.$$

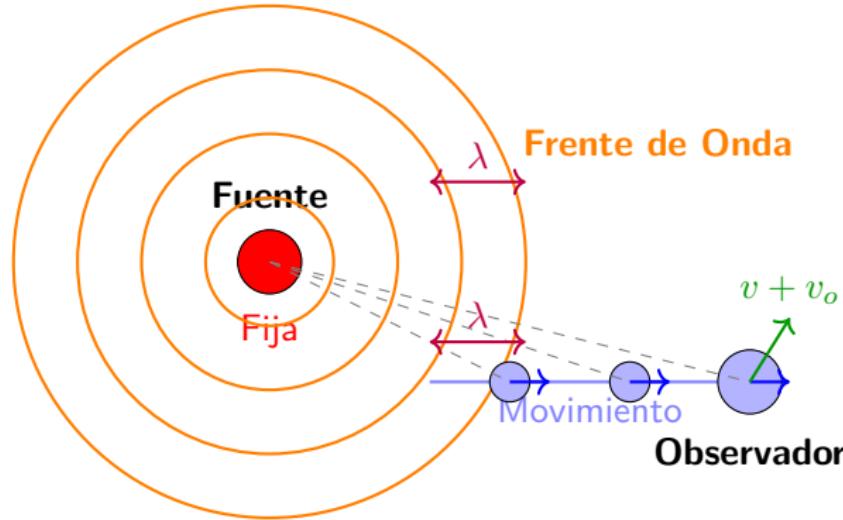
En el caso del observador en movimiento:

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

Sustituyendo la longitud de onda emitida por la fuente en reposo:

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f_0}} = f_0 \left(\frac{v + v_0}{v} \right).$$

Caso 1: Observador en movimiento y fuente en reposo



Ecuación del efecto Doppler

$$f' = f_0 \left(\frac{v + v_0}{v} \right)$$

Signos:

- Si el observador se acerca a la fuente $\rightarrow v_0 > 0 \rightarrow f' > f_0$.
- Si el observador se aleja de la fuente $\rightarrow v_0 < 0 \rightarrow f' < f_0$.

Caso 2: Fuente en movimiento y observador en reposo

Contexto

Si la **fuente se aleja** respecto a nosotros, cada pulso nos llega desde una posición cada vez más lejana que la anterior. Esto provoca que la **longitud de onda aumente**.

Durante cada periodo $T_0 = \frac{1}{f_0}$, la fuente se ha desplazado una distancia:

$$\Delta\lambda = v_s T_0 = \frac{v_s}{f_0}.$$

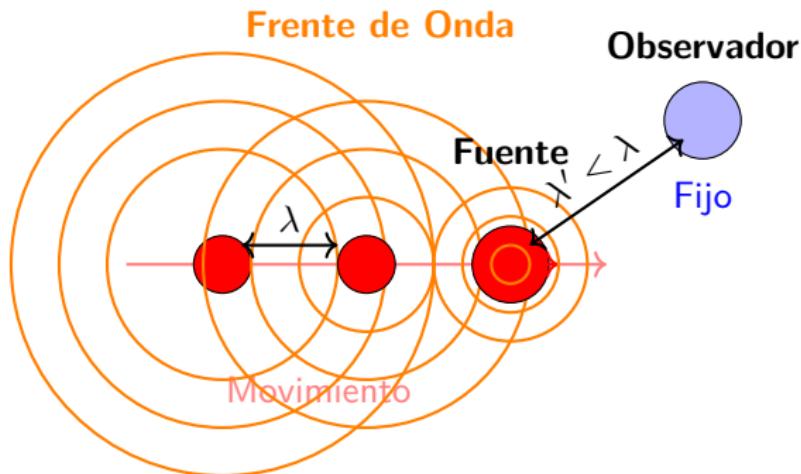
Por tanto, la longitud de onda percibida en el medio será:

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \frac{v}{f_0} + \frac{v_s}{f_0} = \frac{v + v_s}{f_0}.$$

Interpretación

Cuando la fuente se aleja ($v_s > 0$), los frentes de onda se emiten desde posiciones cada vez más alejadas, lo que **aumenta la longitud de onda**.

Caso 2: Fuente en movimiento y observador en reposo



La frecuencia percibida depende de la longitud de onda y la velocidad de propagación:

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

Sustituyendo la longitud de onda $\lambda' = \frac{v+v_s}{f_0}$:

$$f' = \frac{v}{\frac{v+v_s}{f_0}} = f_0 \left(\frac{v}{v + v_s} \right).$$

Resultado (fuente que se aleja)

$$f' = f_0 \left(\frac{v}{v + v_s} \right)$$

En este caso $f' < f_0$, porque cada frente tarda más en llegar al observador.

Caso 2: Fuente en movimiento y observador en reposo

Si la fuente **se acerca**, los frentes de onda se emiten desde posiciones más cercanas, por lo que la longitud de onda disminuye:

$$\lambda' = \frac{v - v_s}{f_0}.$$

Al sustituir en $f' = \frac{v}{\lambda'}$, se obtiene:

$$f' = \frac{v}{\frac{v - v_s}{f_0}} = f_0 \left(\frac{v}{v - v_s} \right).$$

Ecuación general (fuente en movimiento, observador fijo)

$$f' = f_0 \left(\frac{v}{v \mp v_s} \right)$$

Convención de signos:

- “–” si la fuente se **acerca** al observador → f' aumenta.
- “+” si la fuente se **aleja** → f' disminuye.

Fórmula general y casos particulares

Resumen corto

La información presentada anteriormente, se puede sintetizar en una fórmula general:

$$f' = \frac{v + v_0}{v + v_s} f_0$$

siempre interpretando $v_0 > 0$ como acercamiento del oyente y $v_s > 0$ como alejamiento de la fuente.

Casos particulares:

- Observador fijo ($v_0 = 0$), fuente acercándose ($v_s < 0$):

$$f' = \frac{v}{v + v_s} f_0 = \frac{v}{v - |v_s|} f_0 \text{ (frecuencia aumenta).}$$

- Observador fijo ($v_0 = 0$), fuente alejándose ($v_s > 0$): $f' = \frac{v}{v + v_s} f_0$ (frecuencia disminuye).

- Fuente fija ($v_s = 0$), observador acercándose ($v_0 > 0$): $f' = \frac{v + v_0}{v} f_0$.

- Ambos en movimiento: usar la fórmula general sustituyendo los signos con la convención.

Fórmula general y casos particulares

La siguiente tabla resume las ecuaciones correspondientes a los distintos casos del **efecto Doppler** en el sonido presentados anteriormente.

Caso	Situación	Ecuación
1	Fuente acercándose a un observador en reposo	$f' = \frac{v}{v - v_s} f_0$
2	Fuente alejándose de un observador en reposo	$f' = \frac{v}{v + v_s} f_0$
3	Observador acercándose a una fuente en reposo	$f' = \frac{v + v_0}{v} f_0$
4	Observador alejándose de una fuente en reposo	$f' = \frac{v - v_0}{v} f_0$
Ecuación general (ambos en movimiento):		$f' = \left(\frac{v \pm v_0}{v \mp v_s} \right) f_0$

Fórmulas del Efecto Doppler

Casos principales para sonido:

- Fuente en movimiento, observador fijo:

$$f' = f \frac{v}{v - v_s} \quad (\text{fuente se acerca})$$

$$f' = f \frac{v}{v + v_s} \quad (\text{fuente se aleja})$$

- Observador en movimiento, fuente fija:

$$f' = f \frac{v + v_o}{v} \quad (\text{observador se acerca})$$

$$f' = f \frac{v - v_o}{v} \quad (\text{observador se aleja})$$

Donde v es velocidad del sonido, v_s velocidad de la fuente, v_o velocidad del observador.

Regla memotécnica:

- + en numerador si observador **se acerca**
- - en numerador si observador **se aleja**
- - en denominador si fuente **se acerca**
- + en denominador si fuente **se aleja**

Aplicación y resolución de ejercicios

Analizando casos reales del efecto Doppler

En esta sección pondremos en práctica las fórmulas deducidas, resolviendo ejemplos que ilustran el cambio de frecuencia percibido por un observador cuando la fuente o él mismo están en movimiento.

Ejemplo 1: Fuente en Movimiento

Ejemplo Resuelto 1

Un tren emite un pitido de 500 Hz mientras se acerca a una velocidad de 30 m/s. La velocidad del sonido es 343 m/s. ¿Qué frecuencia percibe un observador fijo?

Solución paso a paso:

- ① **Paso 1:** Identifica el caso: Fuente se acerca, observador fijo. Usa $f' = f \frac{v}{v - v_s}$.
- ② **Paso 2:** Sustituye valores:
$$f' = 500 \times \frac{343}{343 - 30} = 500 \times \frac{343}{313} \approx 500 \times 1,095 = 547,5 \text{ Hz.}$$
- ③ **Paso 3:** Razón: Las ondas se comprimen, el tono sube. ¡Como cuando el tren llega a la estación!

Ejemplo 2: Observador en Movimiento

Ejemplo Resuelto 2

Un observador en un coche se acerca a una bocina fija que emite 400 Hz a 20 m/s. Velocidad del sonido: 343 m/s. ¿Frecuencia percibida?

Solución paso a paso:

- ① **Paso 1:** Caso: Observador se acerca, fuente fija. $f' = f \frac{v+v_o}{v}$.
- ② **Paso 2:** Cálculo: $f' = 400 \times \frac{343+20}{343} = 400 \times \frac{363}{343} \approx 400 \times 1,058 = 423,2 \text{ Hz.}$
- ③ **Paso 3:** El observador encuentra más ondas, el tono suena más agudo.
¡Piensa en adelantar a un camión!

Ejemplo 3: Tren acercándose

Ejemplo Resuelto 3

Un tren se acerca a 25 m/s haciendo sonar su silbato de 800 Hz. Un observador está parado en el andén. ¿Qué frecuencia escucha? ($v_{sonido} = 340 \text{ m/s}$)

Solución paso a paso:

- ① **Identificar el caso:** Fuente en movimiento, observador fijo
- ② **Seleccionar fórmula:** $f' = f \cdot \frac{v}{v - v_f}$
- ③ **Sustituir valores:**

$$\begin{aligned}f' &= 800 \cdot \frac{340}{340 - 25} \\&= 800 \cdot \frac{340}{315}\end{aligned}$$

- ④ **Calcular:**

$$f' = 800 \cdot 1,0794 \approx 863,5 \text{ Hz}$$

- ⑤ **Interpretar:** El observador escucha un sonido más agudo (863,5 Hz vs 800 Hz)

Ejercicios para Practicar

Ejercicio 1: Aplicación

Una ambulancia con sirena de 600 Hz se aleja a 25 m/s. ¿Frecuencia percibida? ($v = 343 \text{ m/s}$)

Ejercicio 2: Aplicación

Una ambulancia se aleja de un hospital a 28 m/s. Su sirena emite un sonido de 1200 Hz.

- ① ¿Qué frecuencia escucha un médico parado en la entrada del hospital?
- ② ¿Y un paciente en otra ambulancia que se acerca a 15 m/s?

Ejercicio 3: Aplicación

Un avión vuela hacia ti a 100 m/s emitiendo 800 Hz. ¿Frecuencia al acercarse? ($v = 343 \text{ m/s}$)

Soluciones Ejercicios propuestos

Solución Ejercicio 1

Fuente se aleja: $f' = 600 \times \frac{343}{343+25} = 600 \times \frac{343}{368} \approx 559$ Hz. Tono más grave.

Solución Ejercicio 2

a) Fuente se aleja, observador fijo:

$$f' = 1200 \cdot \frac{340}{340 + 28} \approx 1109 \text{ Hz}$$

b) Ambos en movimiento (se acercan):

$$f' = 1200 \cdot \frac{340 + 15}{340 + 28} \approx 1159 \text{ Hz}$$

Solución Ejercicio 3

Acercándose: $f' = 800 \times \frac{343}{343-100} = 800 \times \frac{343}{243} \approx 1129$ Hz. Muy agudo.