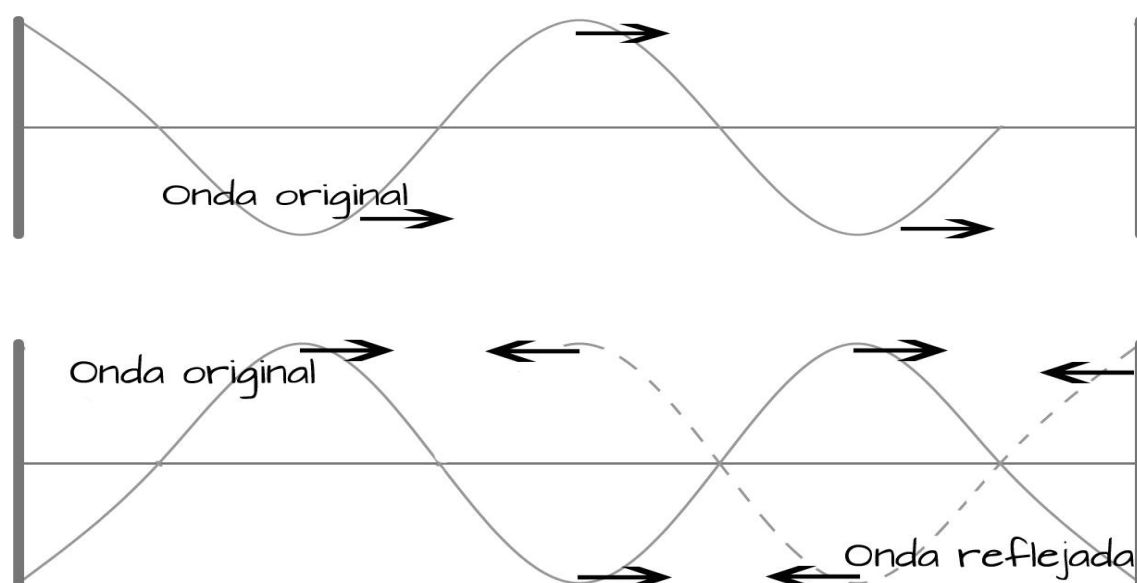


## 1.2- ONDAS ESTACIONARIAS Y SERIE ARMÓNICA

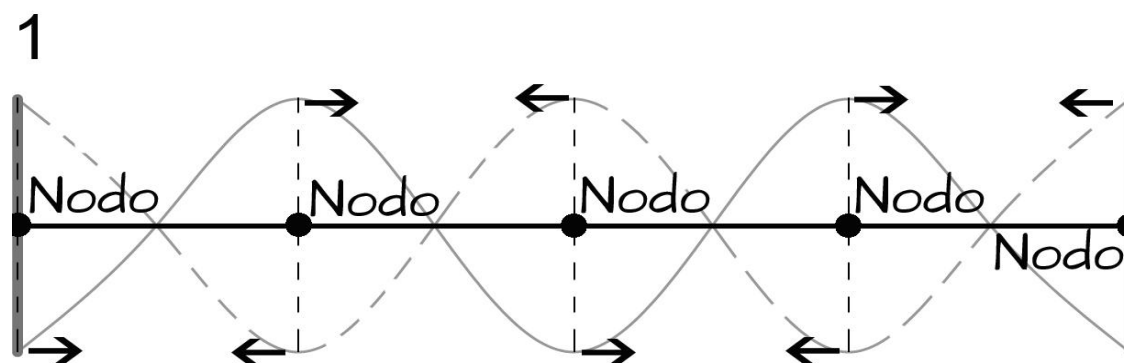
Como vimos en el capítulo anterior, las **ondas estacionarias** se generan en los movimientos vibratorios de la cuerda, en las columnas de aire contenidas en los tubos, en las membranas y en todo tipo de objetos, incluso entre las paredes de una sala.

Cuando el sonido queda atrapado entre dos o más obstáculos enfrentados, como consecuencia de las reflexiones que se producen aparecen ondas estables que viajan constantemente de un obstáculo al otro interfiriendo entre sí en torno a un mismo eje.

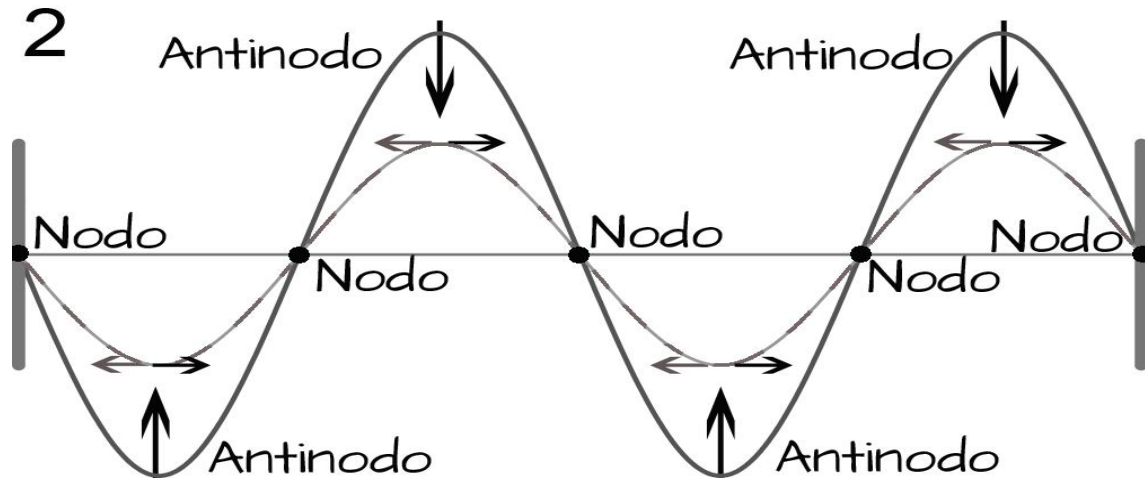
Una onda con longitud de onda determinada topa con uno de los obstáculos, se produce la reflexión y aparece la onda reflejada con igual longitud de onda pero con dirección opuesta.



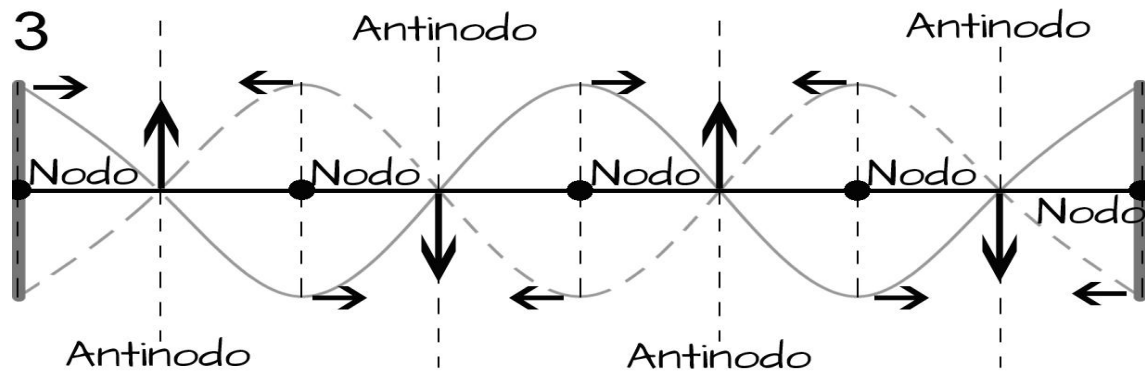
El resultado de las fuerzas vectoriales que ejercen las continuas reflexiones de estas dos ondas es la aparición de la onda estacionaria. En los puntos donde coincide el valle de una onda con la cresta de la otra el movimiento vibratorio se anula. estos puntos se denominan **nodos**.



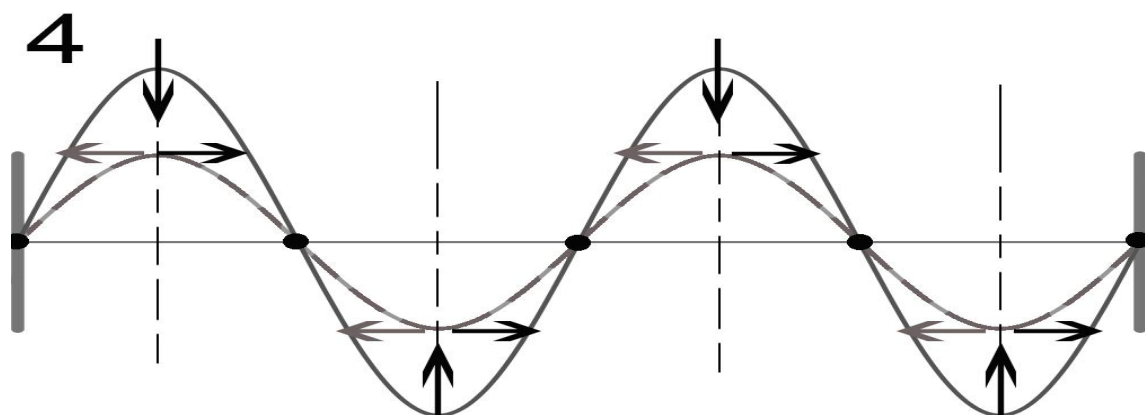
En los lugares donde las crestas y los valles de una onda coinciden con los de la otra se duplica la amplitud de la onda resultante. Estos puntos se denominan **vientres** o **antinodos**.



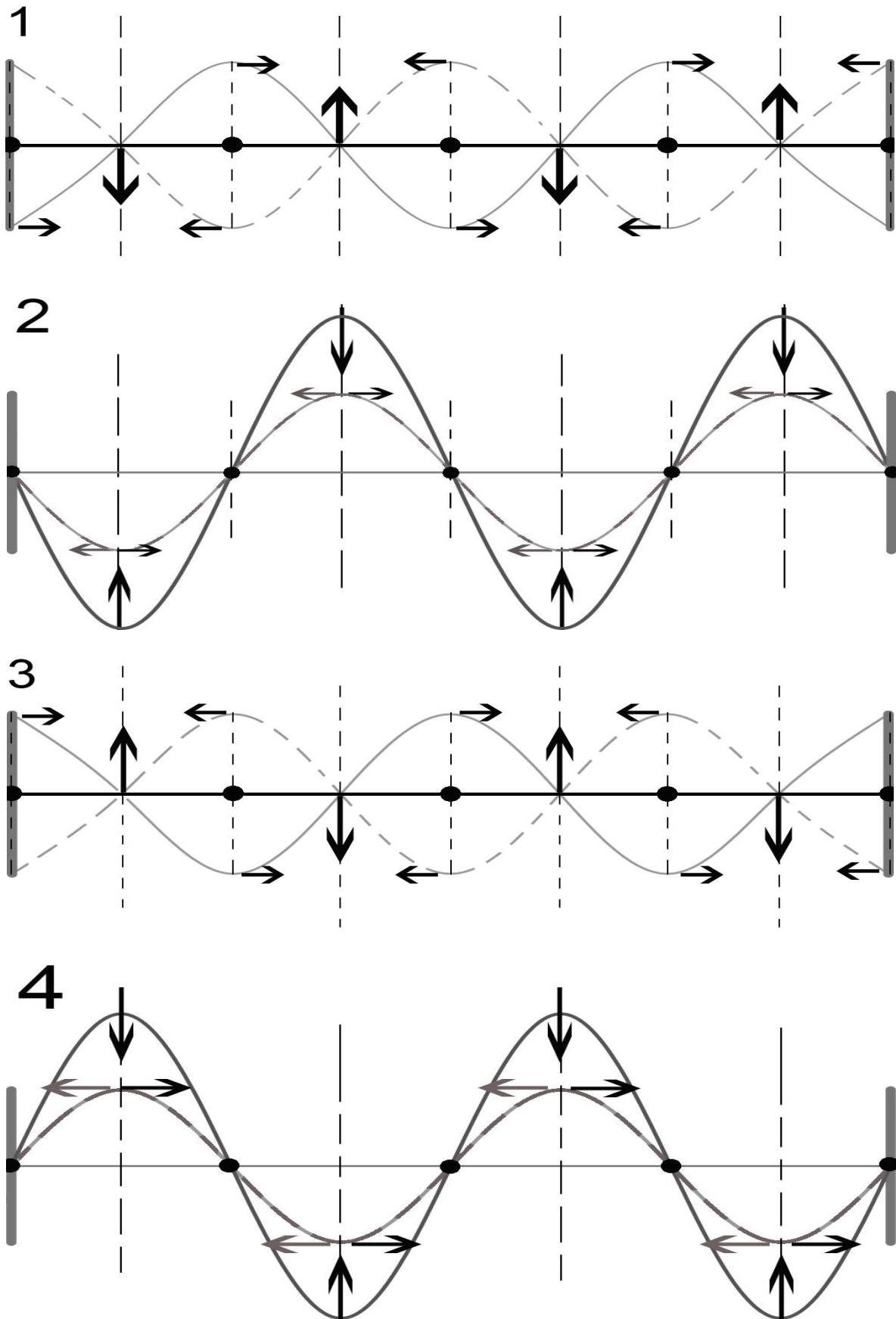
Los nodos y los antinodos son puntos fijos en el eje de la onda estacionaria, de ahí su nombre. La onda estacionaria no se desplaza de un lado hacia el otro. Los antinodos suben y bajan en torno a un punto fijo del eje en función de la posición en la que se sitúan las ondas que reflexionan.



La dirección opuesta de las ondas que continuamente reflexionan entre dos obstáculos provoca que estas entren en fase y desfase cíclicamente dando lugar al movimiento pendular de los antinodos en la onda estacionaria.



El movimiento de la onda estacionara se resume en estos **cuatro estados** y se repite de manera constante.

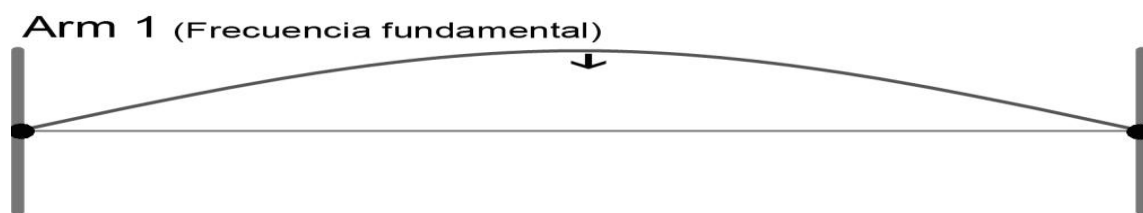


## SERIE ARMÓNICA

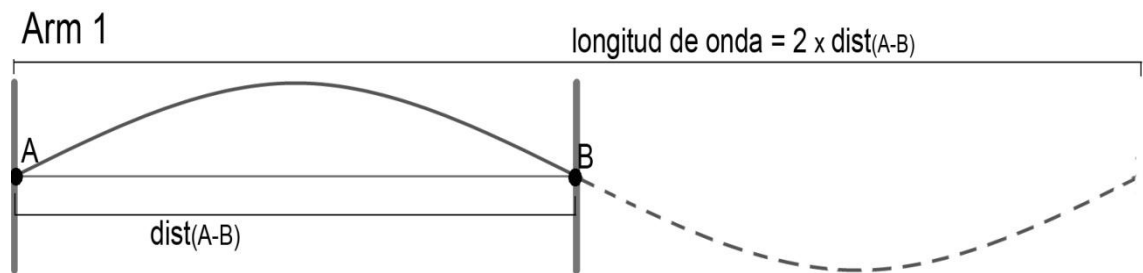
Por lo general cuando se da el fenómeno de las ondas estacionarias, por ejemplo en el movimiento vibratorio de una cuerda o en la vibración de una columna de aire contenida en un tubo, no se produce una única onda estacionaria. Se genera una serie de ondas estacionarias ordenadas proporcionalmente por su longitud de onda conocida como **serie armónica**.

La intensidad a la que vibra cada armónico de la serie define como resultado final el timbre de una voz o instrumento.

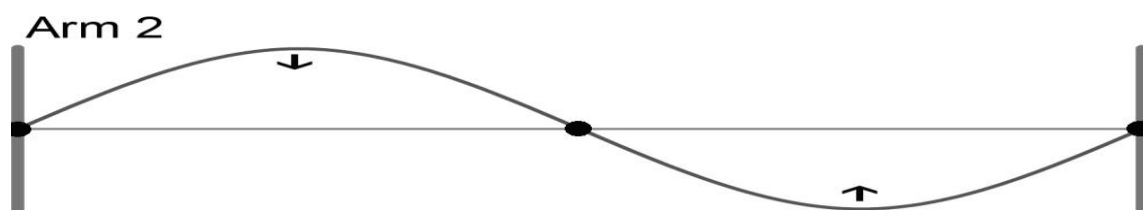
La serie se ordena por el número de nodos que tiene cada armónico. la **primera onda** estacionaria de la serie define la **frecuencia fundamental**, es decir, la frecuencia que nuestro oído reconoce como nota musical. Tiene solamente **dos nodos** situados en los dos obstáculos que provocan las reflexiones.



Su **longitud de onda real** es dos veces la distancia entre los dos obstáculos. En el caso de una cuerda dos veces la longitud de la cuerda.

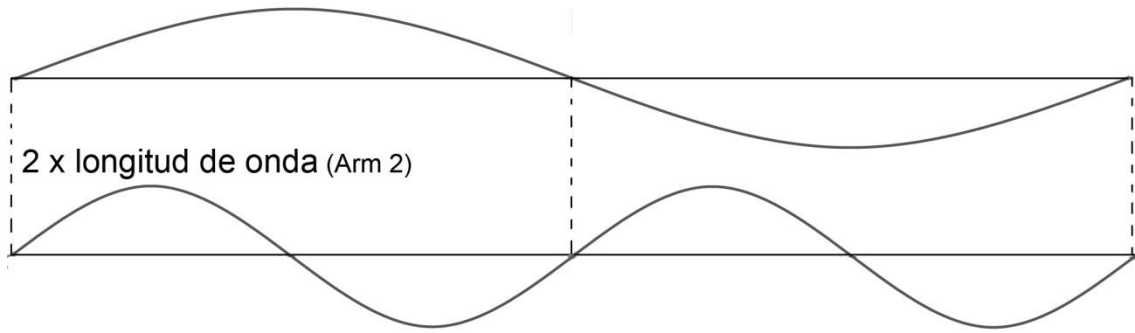


El **segundo armónico** de la serie tiene **tres nodos**. Dos en los dos obstáculos y uno justo en la mitad.



La longitud de onda del segundo armónico es igual a la distancia que existe entre los dos obstáculos, es decir la mitad con respecto a la longitud de onda del primer armónico. En consecuencia el "armónico 2" emplea la mitad de tiempo para completar su periodo. Dicho de otra forma; en el tiempo que el "armónico 1" completa un ciclo completo el "armónico 2" completa dos ciclos completos.

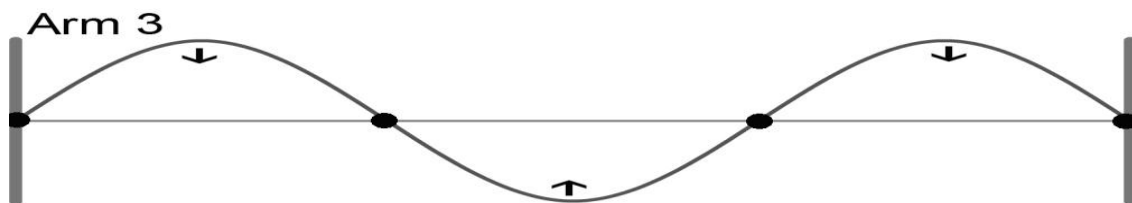
longitud de onda (Arm 1)



Por lo tanto la **frecuencia** del "armónico 2" es el doble con respecto a la **frecuencia** del "armónico 1."

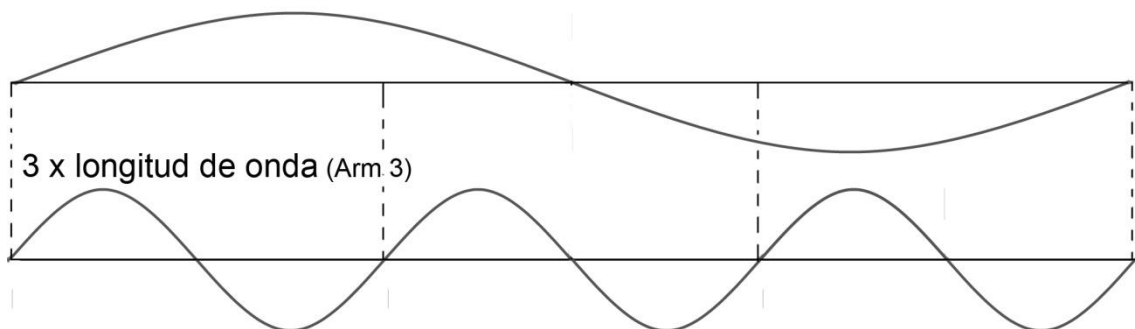
$$f_{(\text{arm}2)} = 2 \times f_{(\text{arm}1)}$$

El **tercer armónico** tiene **cuatro nodos**. Dos en los extremos y otros dos dividiendo la longitud de la cuerda o tubo en tres partes iguales.



La longitud de onda del "armónico 3" es tres veces más pequeña que la longitud de onda del "armónico 1". En el tiempo que emplea el "armónico 1" para completar su periodo el "armónico 3" completa tres periodos.

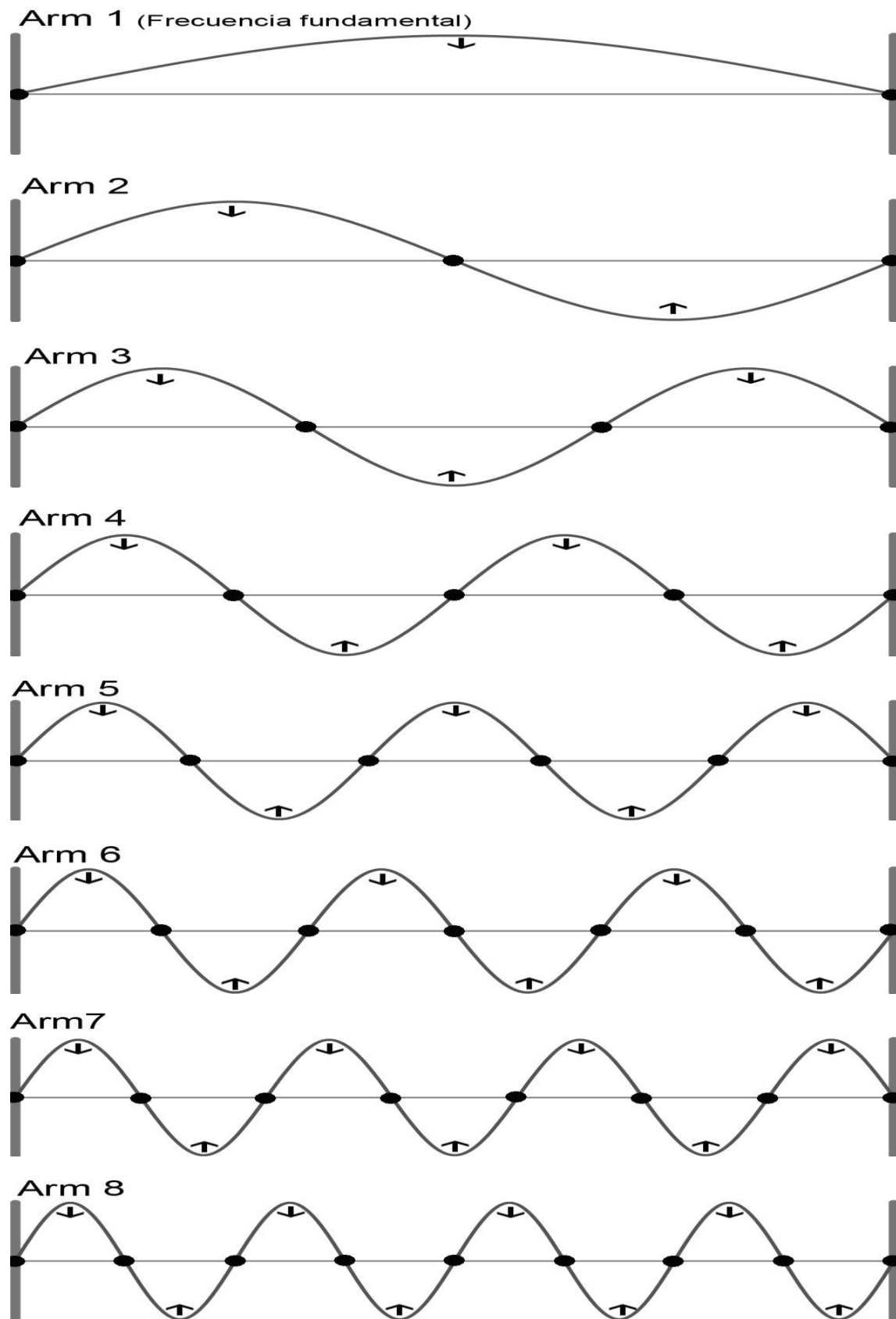
longitud de onda (Arm 1)



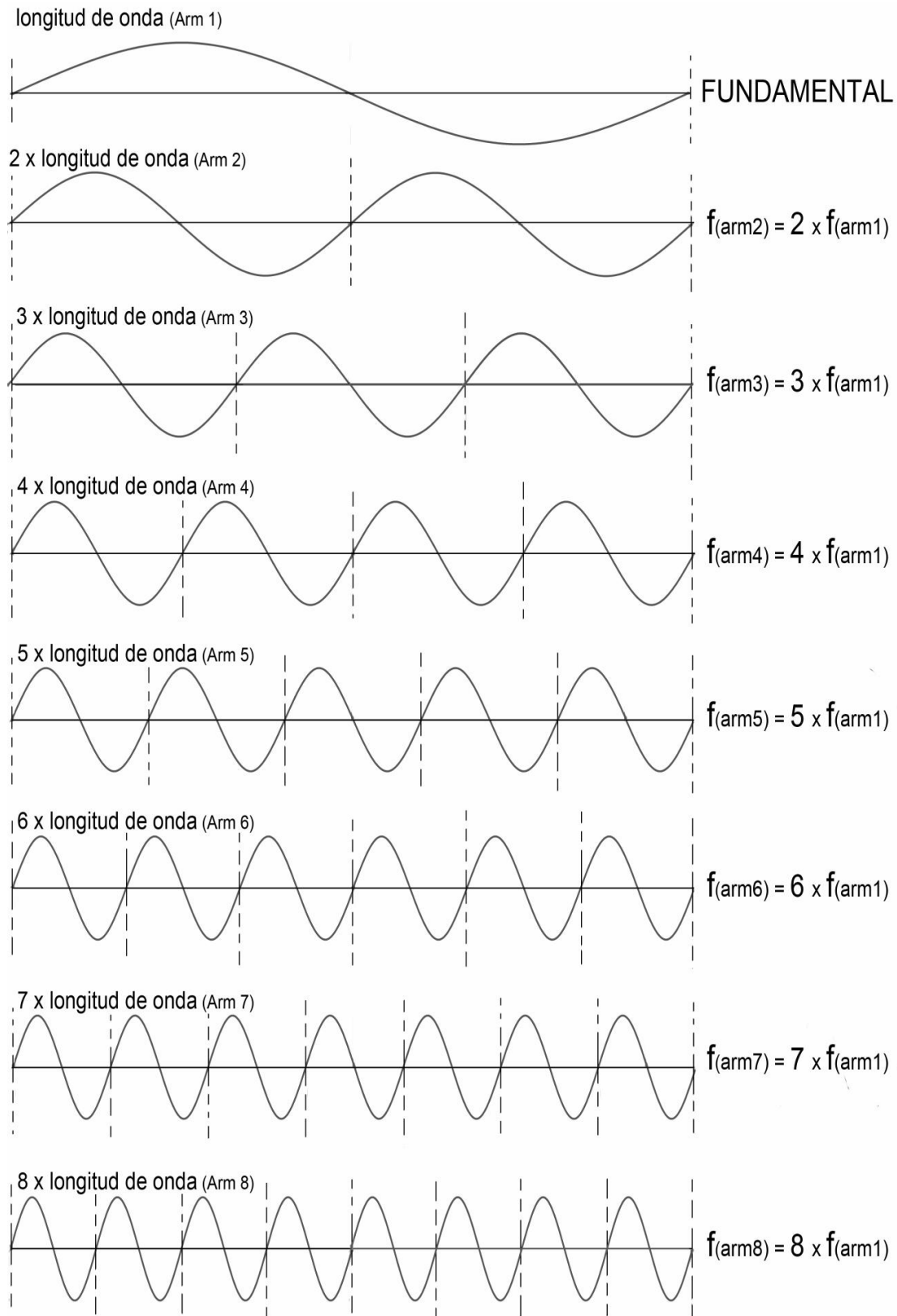
La frecuencia del "armónico 3" es tres veces más alta con respecto a la frecuencia fundamental.

$$f_{(\text{arm}3)} = 3 \times f_{(\text{arm}1)}$$

Cada armónico que aparece en la serie tiene un nodo más que el anterior. Los nodos se reparten a lo largo de la cuerda o tubo dividiéndola en partes iguales.



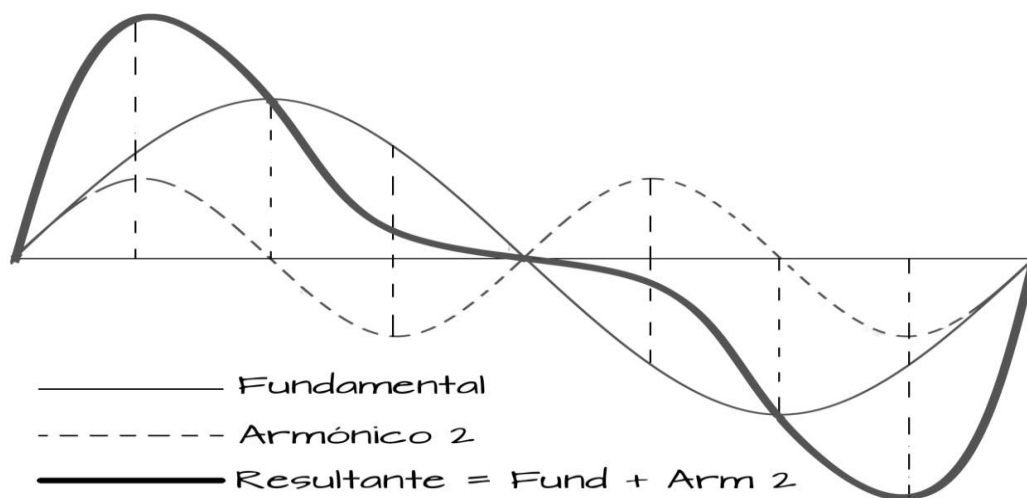
La longitud de onda de cada armónico es proporcionalmente más pequeña con respecto a la fundamental multiplicándose en consecuencia su frecuencia.



El **problema de la cuerda vibrante** suscita gran interés entre los físicos del s.XVIII y principios del XIX. El comportamiento sinusoidal de la frecuencia fundamental se ve alterada por las frecuencias proporcionales de la serie armónica. Aplicando las leyes mecánicas de Newton era necesario explicar cómo hace la cuerda para moverse de tantas maneras diferentes al mismo tiempo. Los cálculos y las demostraciones de Taylor, D'Alembert, Daniel Bernoulli, Euler, Fourier y Dirichlet terminan por constatar que la cuerda vibra acumulando una suma ponderada de armónicos conocida como **"Serie de Fourier"**. Los coeficientes de la



serie de Fourier varían en función de la intensidad con la que vibran los diferentes armónicos determinando el timbre del instrumento. La onda resultante es fruto de la interacción de fuerzas entre la fundamental y sus armónicos. En el siguiente gráfico ilustramos a modo de ejemplo el resultado de la combinación entre la frecuencia fundamental y el "armónico 2".



Curiosamente la "Serie de Fourier" forma parte de publicaciones que realiza su autor sobre la transmisión del calor en sólidos y no sobre acústica. Fourier conocía los estudios previos de D'Alembert, Bernoulli y Euler sobre la cuestión de la cuerda vibrante y termina por encontrar la respuesta al comportamiento sinusoidal interferido de las ondas en su estudio termodinámico. Posteriormente Dirichlet refuerza la base y el fundamento matemático de la teoría con una mayor precisión. Las aplicaciones de la serie de Fourier son actualmente múltiples en cuestiones de acústica, óptica, ingeniería electrónica y telecomunicaciones para el procesamiento de señales, compresión y transmisión de datos, sistemas inalámbricos, también en estudios de física cuántica...

El desarrollo teórico y matemático del fenómeno de los armónicos naturales alcanza su pleno desarrollo con la física postnewtoniana de los siglos XVIII y XIX. Sin embargo es una realidad que se experimenta con facilidad, probablemente vivenciada por la humanidad desde tiempos inmemoriales.

Cualquier instrumentista de cuerda sabe que al pulsar una cuerda colocando con suavidad un dedo sobre ciertos puntos se obtienen diferentes armónicos. Estos puntos son los nodos de las ondas estacionarias contenidas en la cuerda. Al colocar un dedo sobre uno de los nodos se anulan todos los movimientos vibratorios de la cuerda excepto el correspondiente a la onda estacionaria que justo en ese punto no vibra.

También en los tubos conseguimos hacer sonar los diferentes armónicos que este contiene alterando la manera de soplar. Existen incluso "flautas de armónicos" con las que se puede hacer melodías con los armónicos naturales del tubo. Este tipo de flautas son propias de la música tradicional africana, aunque también se dan en el folclore escandinavo.

En los instrumentos de viento metal (como por ejemplo la trompeta) se obtienen las notas de la triada manteniendo una misma digitación. Esto también se explica por el fenómeno de los armónicos naturales.

Existe además una técnica vocal llamada "canto difónico" que permite a un solo cantante realizar dos melodías simultáneas. Cantando una nota grave y proyectando sobre los diferentes resonadores fonadores el vocalista consigue hacer una melodía paralela con los armónicos naturales de su propia voz. Este tipo de canto es propio del folclore mongol.