

CAPITULO 3

CLASES DE ONDAS

INTRODUCCION:

Existen múltiples formas de clasificación de las ondas, tomando en cuenta propiedades muy diferentes. Algunas de ellas son más útiles que otras, pero, en todo caso, no son excluyentes, por lo que vale la pena hacer mención a la mayoría de ellas.

Sin embargo, en el desarrollo del resto de los apuntes se hará énfasis sobre algunas clases en particular, asumiendo que los resultados de su tratamiento se pueden generalizar, a menos que se diga lo contrario.

No incluiremos, sin embargo, las clases de ondas particulares que, por ejemplo, observamos a nuestro alrededor, tales como las ondas sobre el agua, las olas, las ondas de arena, etc.⁴. Igualmente, no haremos mayores referencias a algunas clases especiales de ondas tales como las ondas de De Broglie (ya citadas) o las “*ondas guiadas*” que se producen cuando hay una discontinuidad en el medio en el que se está propagando una onda, apareciendo una tendencia en ella de seguir la superficie de discontinuidad, lo cual es aprovechado para múltiples aplicaciones tecnológicas, tales como las “*líneas de transmisión*” de microondas en las telecomunicaciones⁵.

La tabla N° 2, que a continuación se presenta, contiene la información condensada sobre los diversos tipos de onda, clasificadas de acuerdo a distintas propiedades o características. Más adelante se presenta información detallada sobre las características de cada uno de los tipos de movimiento ondulatorio clasificados según ciertas propiedades y características.

⁴ Al respecto se recomienda el extenso y excelente trabajo “*Ondas a Nuestro Alrededor*” (KÁDOMTSEV Y RYDNIK, 1984: 4-174)

⁵ Para ampliar la información revisar el capítulo “*Ondas guiadas y líneas de transmisión*” (WALDRON, R. A., 1968: 94-129)

TABLA N° 2

CLASES DE ONDAS CONSIDERANDO DIVERSAS PROPIEDADES

PROPIEDAD		NOMBRE	EJEMPLOS
Características del medio	Medio material	• Ondas mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas sonoras • Ondas en agua • Ondas en una cuerda vibrante
	Vacío	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas electromagnéticas • Ondas gravitacionales 	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas de radio • Microondas • Ondas térmicas • Luz • Ondas de alta frecuencia
Movimiento relativo de las partículas del medio respecto a la dirección de propagación	Dirección perpendicular	• Ondas transversales	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas en una cuerda vibrante • Ondas en agua • Ondas electromagnéticas
	Dirección paralela	• Ondas longitudinales	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas sonoras • Ondas comprensivas en un resorte
Número de dimensiones espaciales mínimas para representarla	Una dimensión	• Ondas unidimensionales	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas en una cuerda vibrante • Ondas comprensivas en un resorte
	Dos dimensiones	• Ondas bidimensionales	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas de tensión superficial
	Tres dimensiones	• Ondas tridimensionales	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas planas • Ondas esféricas • Ondas cilíndricas
Perfil de la onda	Senoide o cosenoide	• Ondas armónicas	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas senoidales • Ondas cosenoidales
	Cualquier otra forma de perfil	• Ondas anarmónicas	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas cuadradas • Ondas amortiguadas • Ondas diente de sierra
Cantidad física	Cantidad escalar	• Ondas escalares	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas de presión • Ondas de temperatura
	Cantidad vectorial	• Ondas vectoriales	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas eléctricas • Ondas magnéticas
Movimiento del perfil	Con movimiento	• Ondas viajeras	<ul style="list-style-type: none"> • La luz proveniente de las estrellas.
	Sin movimiento	• Ondas estacionarias	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas estacionarias por reflexión.

SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO:

- **ONDAS MECANICAS:**

Requieren de un medio material para propagarse, tal es el caso de las ondas en el agua, las ondas en una cuerda o resorte, las ondas sonoras en cualquier medio material (generalmente en el aire), las ondas sísmicas en la corteza terrestre, etc. La figura N° 4 muestra e ejemplo de una onda viajera producida por la perturbación repentina del extremo libre de una cuerda que se encuentra empotrada o restringida en el otro extremo. En este caso, la onda no podría propagarse de no existir la cuerda, es decir el medio material.

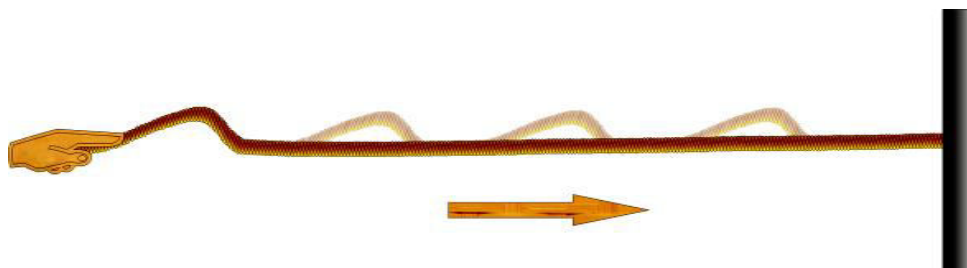


Figura N° 4: Pulso propagándose en una cuerda

- **ONDAS ELECTROMAGNETICAS:**

No necesitan de ningún medio material para propagarse, es decir, se pueden propagar el vacío, aunque el concepto de medio persiste por el requerimiento de un **campo electromagnético** en el espacio que al ser perturbado se propaga, como muestra la figura N° 5. Aquí entran todas las clases de ondas de espectro electromagnético (que veremos más adelante), pero, mencionemos la luz visible, las ondas de radio, la radiación térmica, las microondas, la radiación ultravioleta, los rayos X y gamma.⁶

⁶ Es conveniente advertir que esta clasificación excluye las teorías más recientes sobre la existencia de otras clases de ondas que sin requerir medio material alguno, existirían en el Universo, aun cuando, su origen no está relacionado con las ondas electromagnéticas, tales como las **ondas gravitacionales** cuya existencia explicaría algunas teorías sobre el origen y evolución del universo.

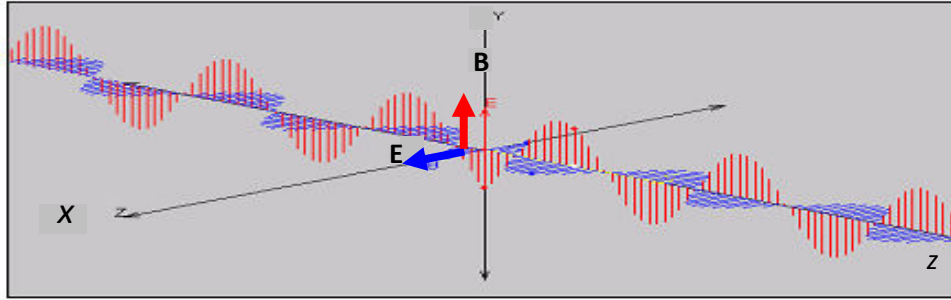


Figura N° 5: Representación de una onda electromagnética

SEGÚN EL MOVIMIENTO DEL MEDIO RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN:

- **ONDAS TRANSVERSALES:**

Son aquellas en que la vibración local del medio es perpendicular a la dirección de propagación. Si se trata de un medio material como, por ejemplo, la cuerda de la figura N° 4 ó el resorte de la figura N° 6, podemos observar que las partículas que componen el medio oscilarán hacia arriba y hacia abajo de su posición de equilibrio, en dirección normal a la horizontal (dirección en que avanza la onda).

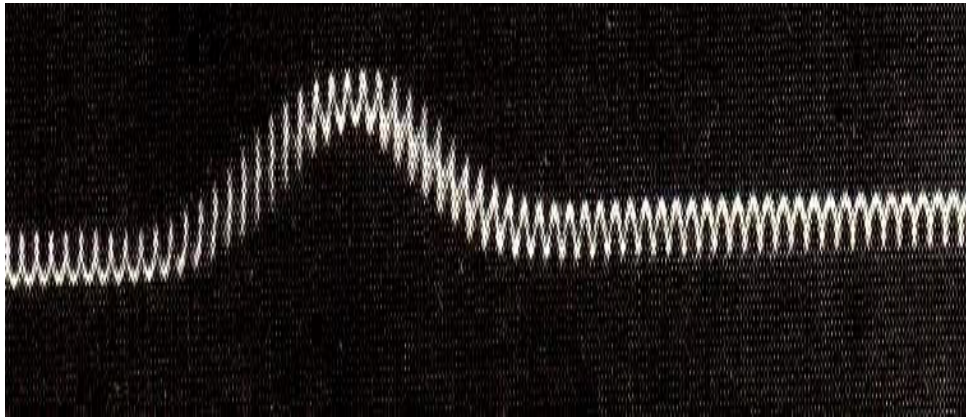


Figura N° 6: Un pulso transversal que se propaga a lo largo de un resorte.
Imagen tomada de “Las Ondas” (ESCALONA, Orlando: 2001)

Al igual que estas ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas son transversales, pues la oscilación de los campos eléctricos y magnéticos asociados, se produce en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como puede verse en la figura N° 5.

• ONDAS LONGITUDINALES:

En las ondas longitudinales la vibración de cada parte del medio es paralela a la dirección en que propaga la onda. Es el caso de las ondas sónicas a las que se propagan a lo largo de un resorte.

Si colocamos colgando un resorte, por uno de sus extremos, y aplicamos un pequeño impulso, estirándolo o comprimiéndolo, en la dirección vertical, se producirá una oscilación vertical en el resorte. Si lo hacemos con cuidado y el resorte es suficientemente largo, observaremos la propagación de la perturbación a lo largo del resorte, como se muestra en la figura N° 7; en la cual se supone que las líneas quebradas representan convenientemente las espiras del resorte.

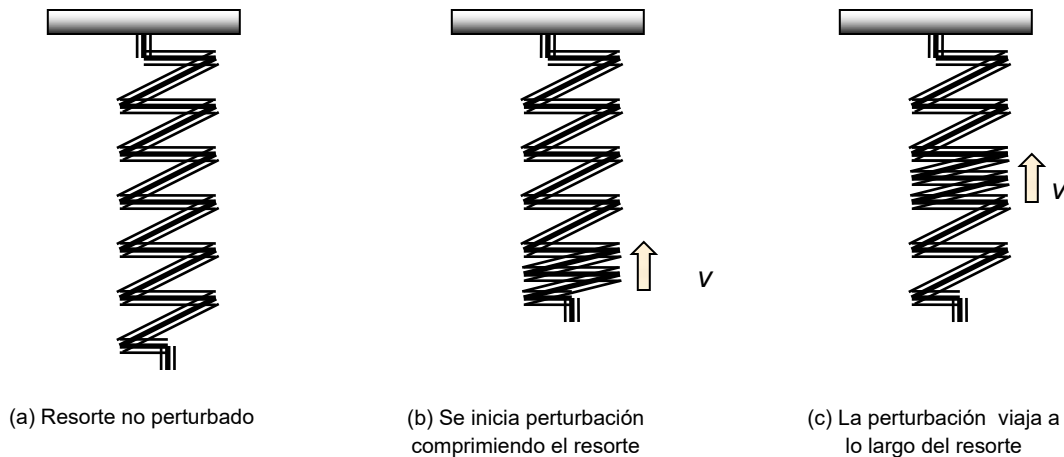


Figura N° 7: *Un pulso longitudinal que se propaga a lo largo de un resorte*

Al comprimir súbitamente el extremo inferior, las espiras inferiores del resorte ejercer fuerzas sobre las espiras superiores adyacentes, haciendo que se propague la compresión a lo largo del resorte en forma de pulso compresivo. Es conveniente notar que ninguna de las partes del resorte se aleja sensiblemente de la posición original de equilibrio, mientras que la onda recorre toda la longitud del resorte.

De modo muy similar se transmiten las ondas sonoras, las cuales son producto de la perturbación, en forma de cambios locales de presión, en el medio, por ejemplo en el aire. Tales cambios de presión se propagan de un sitio a otro a la velocidad del sonido (que es distinta para cada medio material) y son percibidos por nuestro sentido del oído. De hecho es increíble la capacidad de discernimiento

entre un sonido y otro como producto de la combinación de diferencias muy pequeñas en la onda de presión.

NOTA: Se pueden observar ondas cuya clasificación no es exactamente ni transversal ni longitudinal, como las llamadas ondas de torsión que, como indica su nombre, se refieren a ondas que se propagan en la dirección de un eje, alrededor del cual las partículas materiales del medio oscilan en rotación.

Sin embargo, con frecuencia las ondas pueden ser más bien una combinación de ondas transversales y longitudinales, como ocurre con las olas en el agua o cualquier otro líquido. En este caso, la trayectoria seguida por una partícula será una circunferencia o una elipse.

SEGÚN EL NÚMERO MINIMO DE DIMENSIONES NECESARIAS PARA REPRESENTARLA:

- **ONDAS UNIDIMENSIONALES:**

Cualquier perturbación es posible describirla en función de su propagación en el espacio. Si la onda se propaga en una sola dirección podemos considerar entonces la variación de sus características fundamentales como función de una de las coordenadas espaciales, por ejemplo, la coordenada del eje de las X , de las Y o de las Z . Si llamamos ξ a una perturbación unidimensional que se propaga según la dirección del eje X , tendremos que: $\xi = f(x)$, sin importar la naturaleza de la onda, que podría ser, tanto, el desplazamiento transversal de una cuerda o el longitudinal de las espiras del resorte, como la magnitud del campo eléctrico o magnético de una onda luminosa, e incluso la amplitud de la probabilidad cuántica de una onda de materia.

En la figura N° 8 se pone como ejemplo una onda longitudinal que se propaga a lo largo de un metal si uno de sus extremos se golpea regularmente con un martillo.

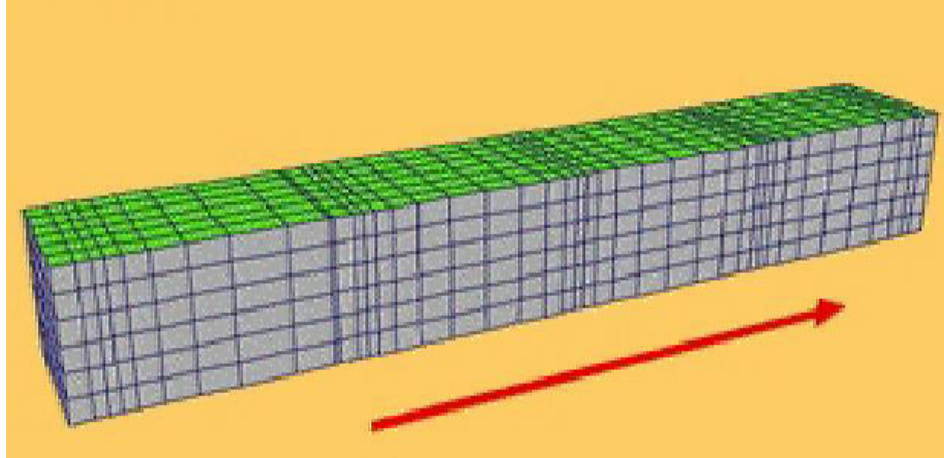


Figura N° 8: *Un ejemplo de onda unidimensional se propaga a lo largo de un metal golpeado longitudinalmente en uno de sus extremos.*

- **ONDAS BIDIMENSIONALES:**

La propagación de una onda circular ocurre simultáneamente en todas las direcciones radiales posibles y, si bien es cierto, en ausencia de obstáculos podríamos describir convenientemente la perturbación en cualquiera de dichas direcciones, pues son equivalentes, no obstante, puede resultar necesario y conveniente realizar su descripción en función de dos coordenadas espaciales, tales como las coordenadas rectangulares $\xi = f(x, y)$ o las coordenadas polares $\xi = f(r, \theta)$. Igualmente, la solución de la perturbación de ondas elásticas producidas en una membrana tensa, requiere la descripción de ondas bidimensionales como se ve en la figura N° 9.

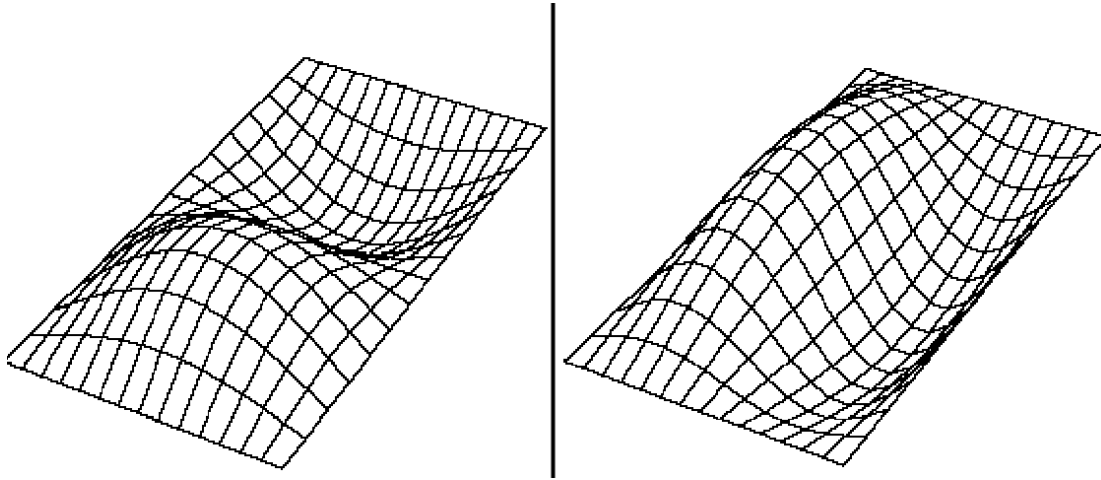


Figura N° 9: Ondas superficiales en una membrana tensa

- **ONDAS TRIDIMENSIONALES:**

Existen muchas perturbaciones de este tipo, que requieren un estudio tridimensional del fenómeno como veremos más adelante la luz es una de ellas y dependiendo de las características específicas del problema resultará conveniente utilizar una representación particular de las diversas coordenadas espaciales. A partir de ello encontraremos otra sub.-clasificación.

- **ONDAS PLANAS:**

Cuando en determinado instante las superficies, sobre las cuales una perturbación es constante, forman un conjunto de planos paralelos, generalmente perpendiculares a la dirección de propagación tendremos ondas planas (ver figura N° 10). Luego deduciremos las ecuaciones que describen esta clase de perturbación a partir de las componentes en coordenadas cartesianas $\mathbf{r} \equiv [x, y, z]$.

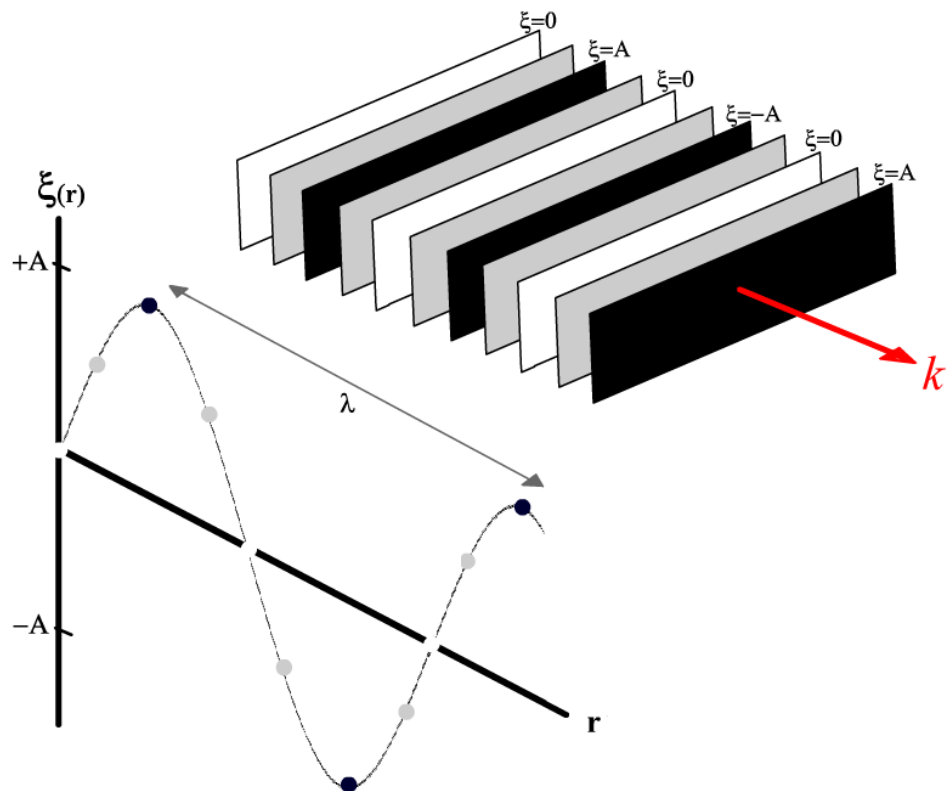


Figura N° 10: Frentes de onda para una onda plana armónica

○ ONDAS ESFÉRICAS:

Si los frentes de ondas tienen forma de esferas concéntricas con radio creciente cuando se propagan en el espacio (ver figura N° 11) resulta más conveniente las coordenadas esféricas $\mathbf{r} \equiv [r, \theta, \phi]$.

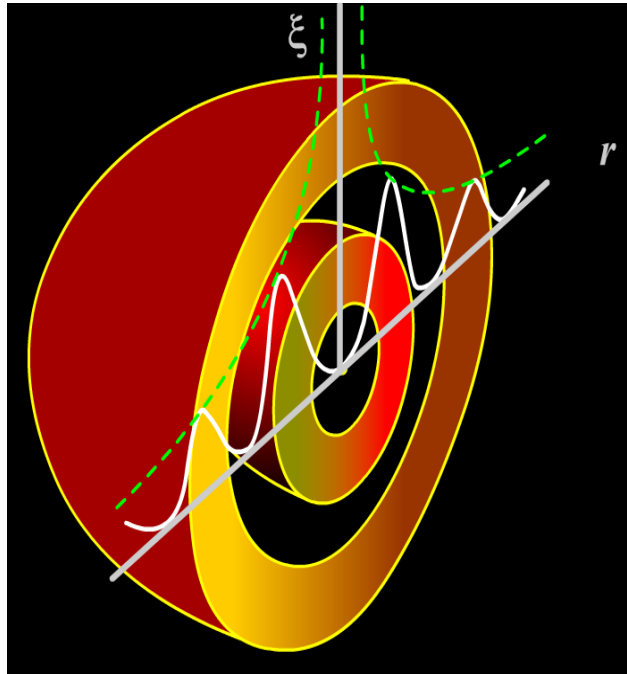


Figura N° 11: Frentes de onda para una onda esférica anarmónica

○ **ONDAS CILÍNDRICAS:**

Cuando los frentes de ondas tienen la forma de cilindros concéntricos se usan las coordenadas cilíndricas para su descripción matemática: $\mathbf{r} \equiv [r, \theta, z]$. En la figura N° 12 se aprecia la formación de ondas cilíndricas en una ranura sobre la que inciden ondas planas, los frentes de onda se curvan al pasar por la ranura. Otro caso interesante, de generación de ondas cilíndricas, es un filamento luminoso largo emisor de ondas electromagnéticas que a distancias cortas del filamento tendrán justamente esta forma.

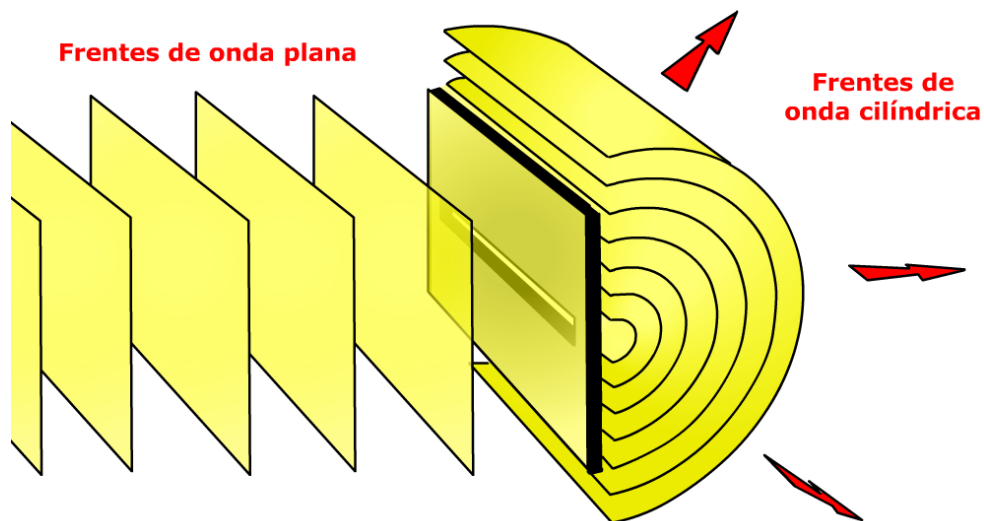


Figura N° 12: Frentes de onda para una onda cilíndrica

SEGÚN LA FORMA O PERFIL DE LA ONDA:

- **ONDAS ARMONICAS:**

Es aquella cuya representación gráfica de la magnitud o amplitud, en función de la coordenada espacial, conocida como perfil de la onda, es una curva senoidal o cosenoidal, como se ve en la figura N° 13.

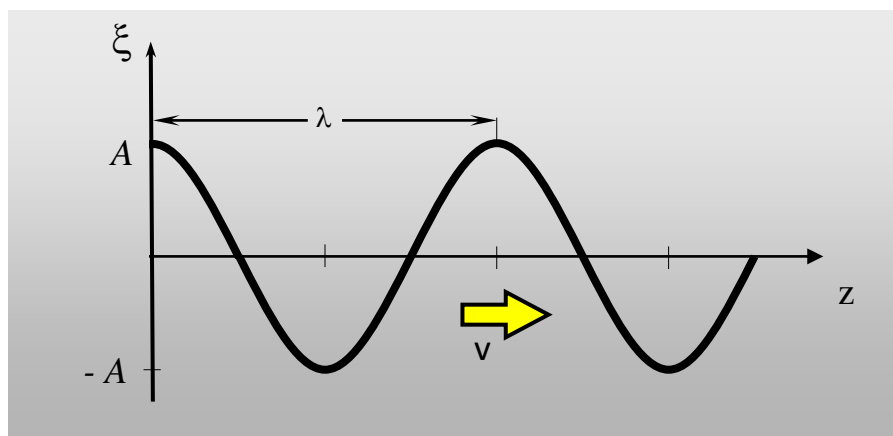


Figura N° 13: Perfil de una onda armónica cosenoidal

Las siguientes expresiones matemáticas representan funciones de onda armónicas aunque, por supuesto, no son las únicas y se pueden obtener otras completamente equivalentes, sustituyendo la función coseno por el seno, que corresponden a las ecuaciones [5] a la [10].

$$\xi = A \cos k(z \mp vt) \quad [20]$$

$$\xi = A \cos(kz \mp \omega t) \quad [23]$$

$$\xi = A \cos 2\pi \left(\frac{z}{\lambda} \mp \frac{t}{T} \right) \quad [21]$$

$$\xi = A \cos 2\pi f \left(\frac{z}{v} \mp t \right) \quad [24]$$

$$\xi = A \cos 2\pi (\chi z \mp ft) \quad [22]$$

$$\xi = A \cos \left(\frac{2\pi z}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T} \right) \quad [25]$$

- **ONDAS ANARMONICAS:**

Son todas aquellas cuyos perfiles no son curvas armónicas (senos o cosenos), sin importar si permanecen constantes o no al transcurrir el tiempo. En la figura N° 14 se observan varios ejemplos:

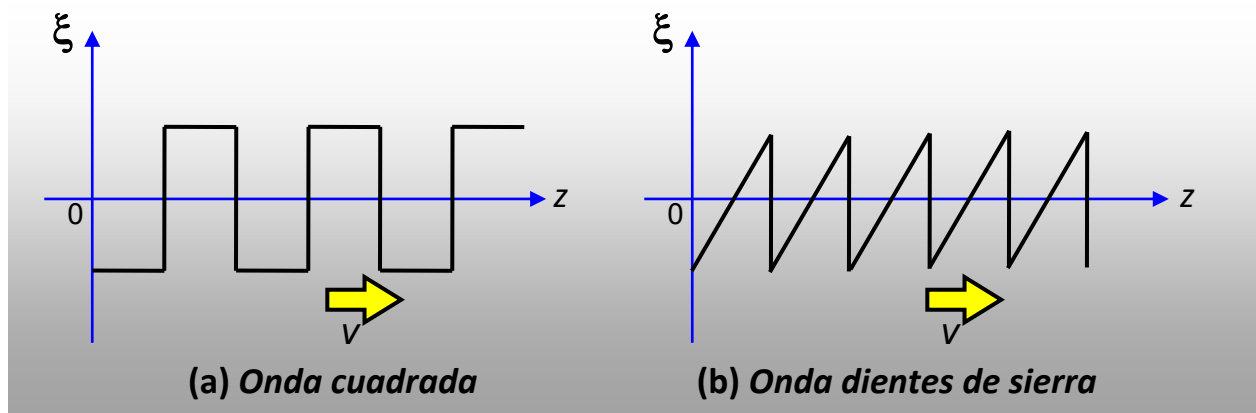


Figura N° 14: Perfiles de ondas anarmónicas

SEGÚN LA CANTIDAD FÍSICA QUE REPRESENTA:

- **ONDAS ESCALARES:**

Corresponden a la representación, como un movimiento ondulatorio, de cantidades físicas como la temperatura y la presión, que quedan completamente especificadas por su magnitud, es decir, se puede tratar como cantidades escalares.

- **ONDAS VECTORIALES:**

Cuando es necesario especificar alguna dirección, aparte de la magnitud, tal como ocurre en un campo eléctrico o magnético, la onda debe representar las características vectoriales de la cantidad física. La dirección del vector puede estar fija o puede variar con el tiempo girando alrededor de la dirección de propagación de manera uniforme o al azar.

Un buen ejemplo de ondas vectoriales son las ondas linealmente polarizadas, figura N° 15, que se propagan sobre un plano que forma cierto ángulo con los ejes coordenados.

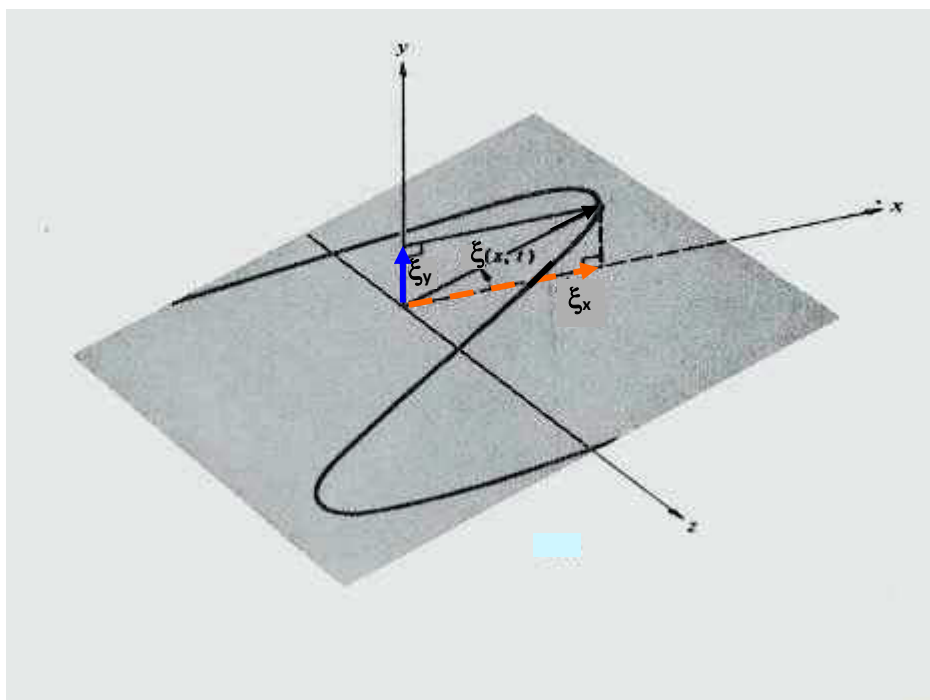


Figura N° 15: Onda polarizada linealmente

SEGÚN EL MOVIMIENTO DE SU PERFIL:

- ONDAS VIAJERAS:**

Cuyo perfil se mueve en el espacio, por lo cual su magnitud dependerá del tiempo, como se muestra en la figura N° 16.

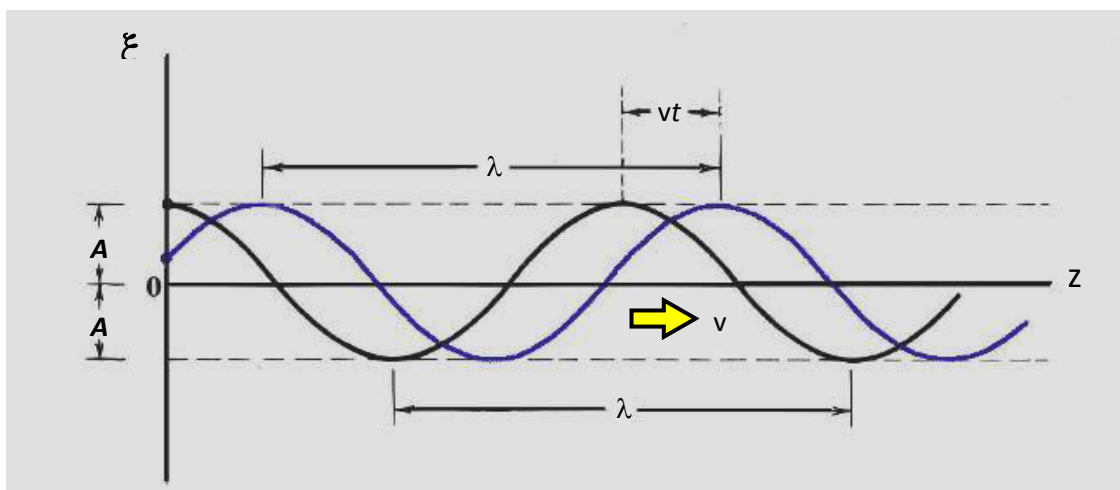


Figura N° 16: Onda viajera

- **ONDAS ESTACIONARIAS:**

Su perfil aparentemente no se mueve en la dirección de propagación sino que permanece fijo o constante en cualquier instante, como se ilustra en las fotografías de la figura N° 17. Surgen por la superposición de dos ondas con ciertas características particulares que más adelante analizaremos.

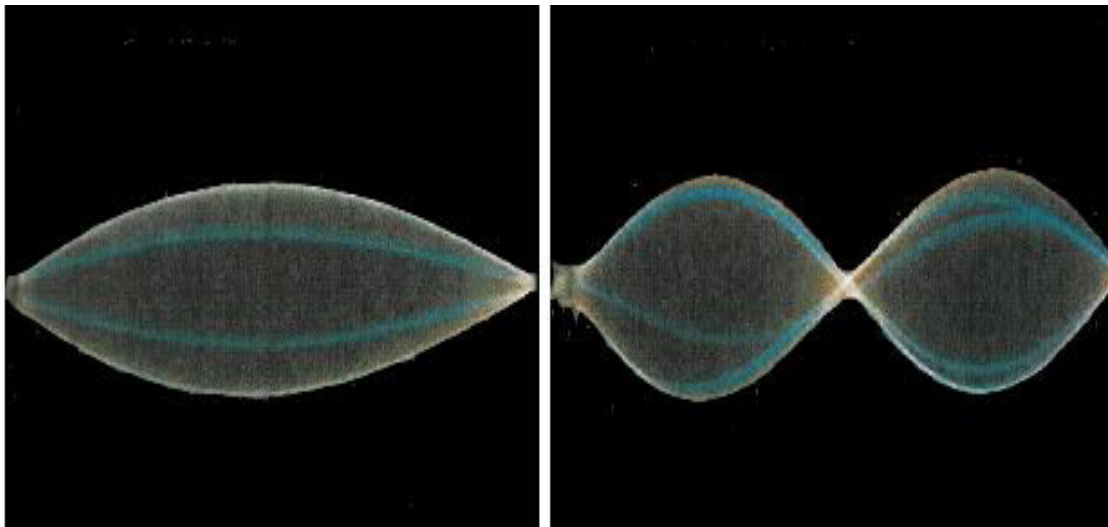


Figura N° 17: Ondas estacionarias en una cuerda vibrante.