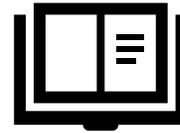




+Cuaderno de apuntes de Física Experimental



Introducción

La asignatura Física Experimental, dentro de los planes de estudio 2015 para las carreras de Ingeniería Geofísica, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica, pretende como un primer intento coadyuvar en la formación científica de los alumnos al introducirlos en el estudio de algunos de los fenómenos físicos que todo estudiante de ingeniería debe conocer, comprender y saber interpretar a través de la experimentación.

En virtud de que el curso de Física Experimental fue adaptado a las necesidades propias de los alumnos de las carreras de ingeniería mencionadas en el párrafo anterior, fue necesario trabajar en este cuaderno de apuntes, que tiene la finalidad de apoyar tanto a los profesores como a los alumnos en el tratado general de los temas que se abordan en el programa de la asignatura. Este cuaderno de apuntes tiene la particularidad de definir los conceptos de forma sencilla y concreta, además de describir algunos fenómenos físicos donde la variables involucradas tienen un comportamiento lineal, y que permiten un modelado matemático sencillo, de tal suerte que esto facilita que los alumnos entiendan su comportamiento y puedan inferir la importancia de las actividades en el laboratorio: desde el diseño de los experimentos, el manejo de los instrumentos de medición para la toma de lecturas, el tratamiento y análisis de los datos experimentales, hasta la obtención de modelos gráficos, modelos matemáticos y la interpretación física que representan en el modelo teórico.

Para la realización de cualquier experimento de laboratorio, es conveniente seguir el método científico, ese que desde la educación básica se aborda en los libros de texto. En este sentido, cabe mencionar que la asignatura de Física Experimental tiene laboratorio integrado, por tanto, el mismo profesor de teoría impartirá las sesiones experimentales apoyándose de un manual de prácticas con el enfoque del método científico.

El manual de prácticas de laboratorio de Física Experimental fue diseñado con base en el contenido del programa de la asignatura y consta de doce prácticas distribuidas como se indica en la tabla de abajo.

Tema	Prácticas
Conceptos básicos de metrología.	Caracterización de un voltímetro analógico.
	Caracterización de un dinamómetro.
Mecánica clásica.	Movimiento uniformemente acelerado.
	Movimiento y energía en un plano inclinado.
Mecánica de fluidos.	Propiedades de las sustancias.
	Gradiente de presión.
Termodinámica.	Algunas propiedades térmicas del agua.
	Leyes de la Termodinámica.
Electromagnetismo.	Carga y corriente eléctricas.
	Fuerza magnética sobre un conductor.
Movimiento ondulatorio.	Movimiento ondulatorio.
Óptica geométrica.	Reflexión y refracción (transmisión) de la luz.

Cada una de las prácticas de laboratorio está estructurada de tal forma, que el estudiante pueda aplicar el método científico para reproducir, analizar y comprobar el comportamiento de algunos fenómenos de las diferentes áreas de la Física. El formato de las prácticas contempla, las medidas de seguridad en la ejecución de los experimentos, los objetivos de aprendizaje, la lista de materiales y equipos de medición a utilizar, las instrucciones para realizar los experimentos, los diagramas de conexión y las actividades que el alumno debe registrar y reportar en su informe de práctica, esto incluye, los modelos gráficos y matemáticos correspondientes, así como una serie de preguntas finales a manera de corroborar el aprendizaje por parte del alumno. Al final de cada práctica se incluyen algunas expresiones matemáticas relacionadas con el tema y que servirán de recordatorio durante el trabajo experimental. Por último, se sugieren algunos títulos de libros como bibliografía para que el alumno pueda profundizar en el tema de la práctica.

Debido a que el laboratorio de Física Experimental se encuentra certificado bajo la norma ISO9001:2015, en el proceso de impartición de prácticas, es importante la participación tanto del profesor como de los alumnos en las actividades que repercutan en el buen desempeño del Sistema de Gestión de la Calidad, que busca ante todo, brindar el mejor servicio a los alumnos en cuanto al buen estado de las instalaciones, la suficiencia de material y equipo y la garantía de contar siempre con el apoyo académico necesario para realizar el trabajo experimental. Todo esto en espera de ver reflejada una buena formación científica en los alumnos como parte esencial en su proceso de aprendizaje.

Profesores que apoyaron en la elaboración y revisión de estos apuntes.

Elizabeth Aguirre Maldonado
Luis Javier Acosta Bernal †
Eduardo Bernal Vargas
Juan Carlos Cedeño Vázquez
Alicia María Esponda Cascajares
Rigel Gámez Leal
Beatriz Eugenia Hernández Rodríguez
Gabriel Alejandro Jaramillo Morales
Mayverena Jurado Pineda
Lucía Yazmín Juárez de la Mora
Eduardo López Molina
M. del Carmen Maldonado Susano
María del Carmen Melo Díaz
Carlos Alberto Pineda Figueroa
María Ofelia Rodríguez Durán
Luis Andrés Suárez Hernández
Rafael Guillermo Suárez Nájera
Manuel de Jesús Vacío González
Fernando Vega Calderón
Alfredo Velásquez Márquez
Salvador Enrique Villalobos Pérez

7. Movimiento ondulatorio

Objetivo: El alumno describirá y analizará el fenómeno ondulatorio estudiando experimentalmente algunas de sus variables físicas relevantes, para establecer su modelo matemático.

7.1 Conceptos de onda y onda viajera. Ondas longitudinales y transversales. Onda estacionaria. Ondas viajeras unidimensionales armónicas. Amplitud y longitud de onda, número de onda y frecuencia angular. La función de onda para una onda armónica, frecuencia, rapidez de propagación y modos de vibración. Planeación del experimento.

Antes del hablar del fenómeno ondulatorio es muy importante detenerse y buscar en nuestro entorno algunos sucesos y actividades donde las aplicaciones de las “ondas” están presentes; por ejemplo, en el horno de microondas al calentar nuestra comida, en las ondas de radio, la luz, las telecomunicaciones, el sonido de una ambulancia, las ondas de televisión, la red Wifi, en los sismos, entre otros.

Ahora bien, para estudiar y comprender el fenómeno ondulatorio, es importante revisar algunos conceptos básicos antes de plantear algunas de las ecuaciones que rigen el comportamiento de dicho fenómeno.

7.1.1 Onda

Una onda es una perturbación en un sistema en equilibrio que transporta energía a través de un material o sustancia llamado medio. Esta perturbación se propaga en el tiempo de una región a otra del espacio, es decir:

$$u = f(x, t)$$

Supongamos que arrojamos una piedra en una alberca de agua tranquila. La piedra produce perturbación en el agua, la cual se propaga hacia afuera en círculos concéntricos. Por lo tanto, la energía está propagándose desde la región de la perturbación. Son relativamente pequeñas las distancias que recorren las partículas de agua (ver Figura 7.1).



Figura 7.1. Perturbación en el agua.

En la naturaleza existen básicamente dos tipos de ondas: las ondas mecánicas, producidas por una vibración y que se transportan a través de un medio físico; y las ondas electromagnéticas, que pueden viajar incluso en el vacío.

Cabe resaltar que las ondas independientemente de su naturaleza transportan energía, pero no materia, cuando viajan de una región del espacio a otra.

7.1.2 Onda viajera

Es aquella que se desplaza a través de un medio en un tiempo determinado. Para su estudio, las ondas viajeras se clasifican en ondas longitudinales y ondas transversales.

7.1.3 Ondas longitudinales

Son aquellas en las que las oscilaciones son paralelas al desplazamiento del medio, como se observa en la figura 7.2. Un ejemplo de este tipo de ondas es el sonido.

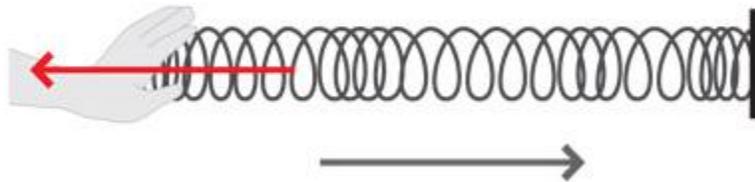


Figura 7.2. Onda longitudinal. (<http://catalogacionrua.unam.mx/enciclopedia/index.html>)

7.1.4 Ondas transversales

Son aquellas en las que las oscilaciones son transversales al desplazamiento del medio (ver Figura 7.3), por ejemplo, la luz polarizada es una onda transversal.

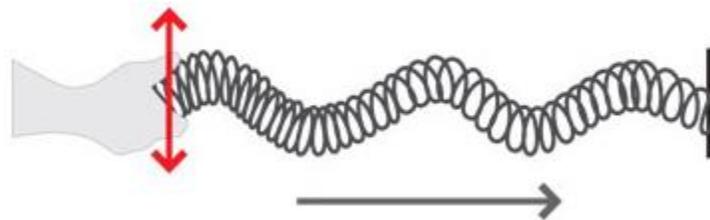


Figura 7.3. Onda transversal.

Algunas ondas de la naturaleza pueden ser transversales y longitudinales; las ondas en la superficie del agua son un buen ejemplo.

Las ondas tridimensionales que viajan desde un punto debajo de la superficie de la Tierra donde se presenta un terremoto, son de ambos tipos, transversales y longitudinales. Las ondas longitudinales son más rápidas y viajan con magnitudes de velocidad de 7 a 8 [km/s] cerca de la superficie. Por su parte las ondas transversales viajan a través de la tierra a 4 o 5 [km/s] cerca de la superficie.

7.1.5 Onda estacionaria

En este tipo de ondas ciertos puntos llamados nodos permanecen inmóviles.

Nodo es un lugar donde la función vale cero.

Una onda estacionaria se forma por la suma de dos ondas de la misma naturaleza con igual amplitud, longitud de onda y frecuencia que avanzan en sentido opuesto a través de un medio.

7.1.6 Ondas viajeras unidimensionales armónicas

Las ondas unidimensionales son aquellas que se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio, como las ondas en las cuerdas. Si la onda se propaga en una dirección única, sus frentes de onda son planos (una sola dimensión) y paralelos.

Supongamos que movemos una cuerda hacia arriba y hacia abajo de forma armónica, de amplitud A (máximo desplazamiento en el medio), frecuencia f y frecuencia angular ω .

La onda resultante se puede describir como una serie de crestas y valles, como se muestra en la figura 7.4.

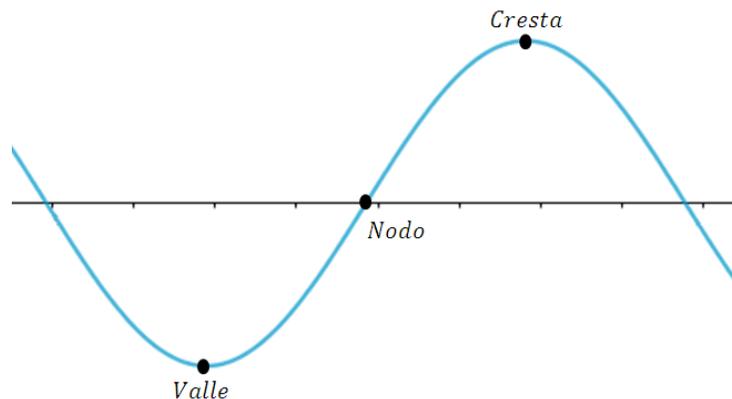


Figura 7.4. Características de onda viajera.

De la figura se puede observar que una cresta es el punto más alto de la onda y un valle es el punto más bajo de la onda. Decimos que es una onda armónica ya que esta sucesión de crestas y valles se asemeja un movimiento armónico simple.

La onda más simple que presenta este comportamiento se le conoce como onda sinusoidal. Cualquier otra onda que presente un comportamiento periódico (es decir, que se repite cada cierto tiempo) puede representarse como una combinación de diversas ondas sinusoidales con diferentes características (amplitud, frecuencia, longitud de onda, etc.).

7.1.7 Amplitud de onda

La amplitud de onda (A) es la medida de la línea de referencia a la cresta. La amplitud pico a pico es la medida que hay del punto más alto, al punto más bajo de la onda. Lo anterior se puede verificar en la figura 7.5. Ejemplo de unidades en los que se mide la amplitud de una onda electromagnética $[\frac{N}{C}]$, la amplitud de la cuerda $[m]$, etc.

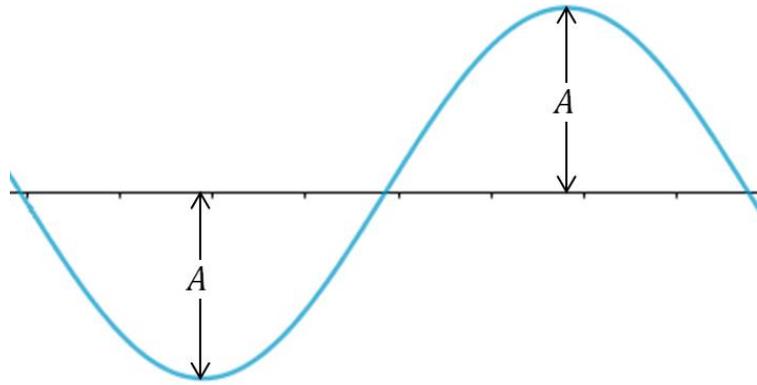


Figura 7.5. Amplitud de onda.

7.1.8 Longitud de onda

Es la distancia que recorre la onda entre cresta y cresta y/o entre valle y valle. Se representa con la letra del alfabeto griego lambda λ . Su unidad en el SI es el metro, $[m]$. En la figura 7.6 se indica la longitud de onda.

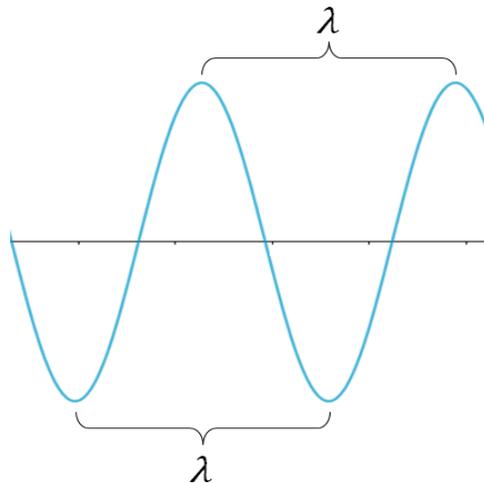


Figura 7.6. Longitud de onda.

7.1.9 Número de onda (k)

El número de onda angular es la cantidad de ondas que se producen en una determinada longitud, su unidad es $[m^{-1}]$. También llamado constante de propagación. Se determina por medio de la expresión siguiente.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

7.1.10 Periodo, frecuencia y frecuencia angular

El periodo es el tiempo que transcurre al completarse un ciclo, o una oscilación completa, antes de que se repita nuevamente, su unidad en el SI es el segundo [s], ver figura 7.7. Para una onda sinusoidal, el periodo se calcula con la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{f}$$

donde: f es la frecuencia de la onda.

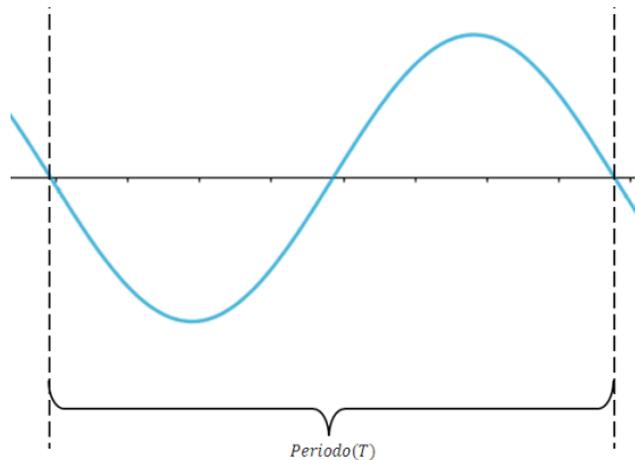


Figura 7.7. Periodo de una onda.

La frecuencia se define como el número de ciclos que se repiten en la onda en un segundo. Se determina a partir del inverso del periodo, esto es:

$$f = \frac{1}{T}$$

La unidad en el SI del periodo es el segundo [s] y la unidad en el SI de la frecuencia es el hertz [Hz].

La frecuencia angular (ω) es una forma alternativa de expresar la frecuencia de las ondas, tiene por unidad al radián sobre segundo [rad/s] para obtenerla se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

7.1.11 Función de onda para una onda armónica

La rapidez de propagación de una onda es la magnitud de la razón de cambio a la que se propaga la perturbación de la onda a lo largo de su desplazamiento. La rapidez a la que se propaga la onda depende tanto del tipo de onda como del medio por el que esta se propaga.

Cualquier onda unidimensional que viaja con una rapidez “v” en la dirección “x” se representa mediante una función de onda de la forma:

$$y(x, t) = f(x \pm vt)$$

Donde el signo positivo se aplica a una onda que viaja en la dirección x negativa y el signo negativo se aplica a una onda que viaja en la dirección x positiva.

Una onda sinusoidal que viaja hacia la derecha se puede expresar con una función de onda:

$$y(x, t) = A \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right]$$

Donde A es la amplitud de onda, λ es la longitud de onda y v es la rapidez de la onda.

Otra forma de expresar la función de una onda sinusoidal es involucrando el número de onda angular (k) y la frecuencia angular (ω), esto es:

$$y = A \operatorname{sen} (kx - \omega t)$$

7.1.12 Rapidez de propagación.

En cualquier caso, generalmente la rapidez está relacionada con el valor de la longitud de onda y el periodo. La relación se puede expresar matemáticamente a través de las expresiones siguientes:

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

en donde v es la rapidez de la onda medida en metros sobre segundo [m/s], λ es la longitud de onda medida en metros [m], T es el periodo medido en segundos [s] y f es la frecuencia de la onda en hertz [H]

Ahora bien, si una cuerda bajo tensión se jala hacia los lados y luego se libera, la fuerza de tensión es responsable por acelerar un elemento particular de la cuerda de regreso hacia su posición de equilibrio. De acuerdo con la segunda ley de Newton, la aceleración del elemento aumenta con tensión creciente. Si el elemento regresa al equilibrio más rápidamente debido a esta aceleración aumentada, intuitivamente se argumentaría que la rapidez de la onda es mayor. En consecuencia, se espera que la rapidez de la onda aumente con tensión creciente.

Del mismo modo, ya que es más difícil acelerar un elemento pesado de la cuerda que un elemento ligero, la rapidez de la onda debe disminuir a medida que aumente la masa por unidad de longitud de la cuerda. Si la tensión en la cuerda es T y su masa por unidad de longitud es μ , la rapidez de onda se puede determinar como:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Donde T es la tensión de la cuerda medida en newton [N] y μ es la densidad de la cuerda, misma que se puede determinar como $\mu = \frac{m}{L}$ en unidades [kg/m]

7.1.13 Modos de vibración (n)

Se denominan modos de vibración de una cuerda a las diversas formas en las que ella puede vibrar, generando ondas estacionarias.

Cuando las ondas están confinadas en una cuerda, éstas viajan de un lado al otro reflejándose en los extremos fijos y, por ende, en todo momento existen ondas propagándose en los dos sentidos. Dependiendo de la longitud y características de la cuerda, existen ciertas frecuencias para las cuales la superposición de las ondas que se propagan en ambos sentidos resulta constructiva produciendo una onda estacionaria.

En una onda estacionaria cada partícula de la cuerda oscila con la misma frecuencia y fase que las demás, es decir, corresponde a un modo de vibración. Una partícula que en un instante forma parte de la cresta de la onda, oscila permanentemente con la mayor amplitud. Una partícula que está en reposo en un instante permanece en reposo por el resto del tiempo (nodo). Por consiguiente, los máximos de amplitud de vibración y los nodos (reposo), están ubicados siempre en los mismos lugares, para una dada frecuencia de vibración. Cada partícula vibra permanentemente con la misma amplitud, dependiente de su posición, mientras que la frecuencia y la fase son iguales para todas las partículas, por lo cual, toda la cuerda pasa por la posición de equilibrio simultáneamente.

Para determinar un modo de vibración se debe establecer la tensión de la cuerda e ir cambiando la frecuencia de oscilación para buscar diferentes modos de vibración de la cuerda. Para esto, debemos tener en cuenta que en los nodos no hay vibración es decir que su amplitud es 0, lo que significa que la longitud de la cuerda nada más puede ser un número entero de mitad de longitud de onda, es decir:

$$\lambda = \frac{2L}{n}$$

siendo λ la longitud de onda, L la longitud de la cuerda y $n = 1,2,3,\dots$, cuando $n = 1$ tenemos el primer modo de vibración, $n = 2$ el segundo, $n = 3$ el tercero y así sucesivamente, tal como se muestra en la figura 7.8.

Cabe mencionar que la longitud de onda depende de la velocidad de propagación de la onda, y ésta al mismo tiempo de la tensión de la cuerda, y de la frecuencia.

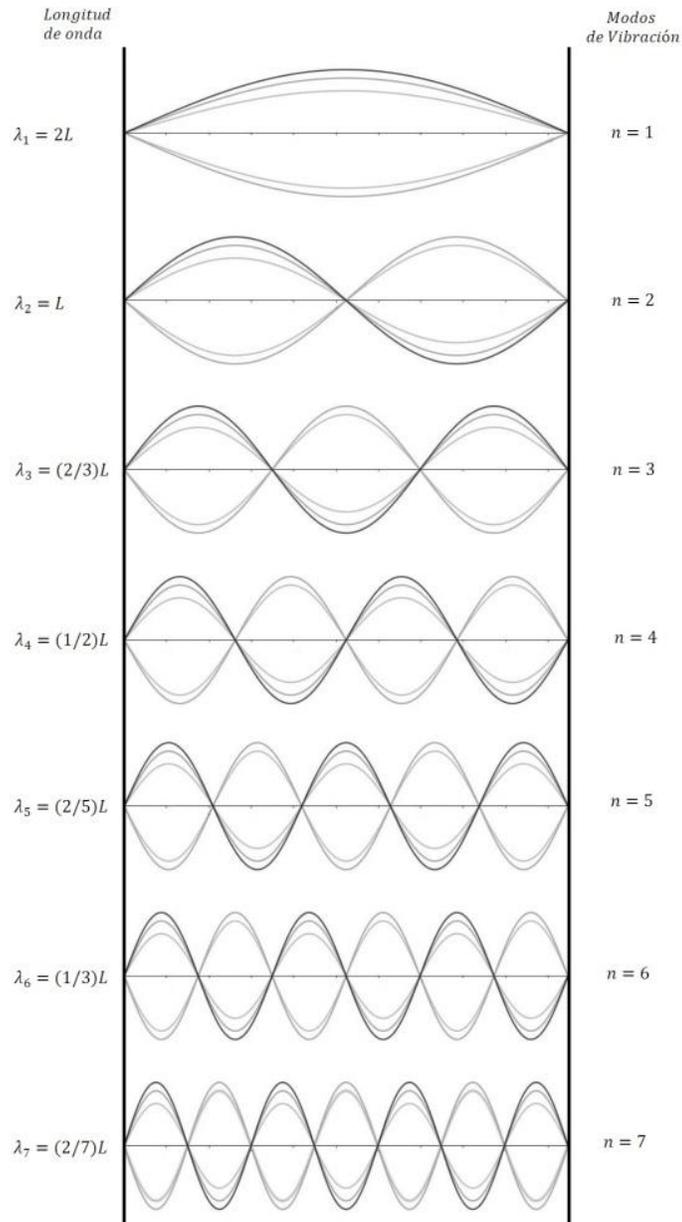


Figura 7.8. Modos de vibración.

7.2 Registro y tabulación de las variables: longitud de onda y frecuencia.

Si se desea obtener la longitud de onda asociada a la frecuencia a la que se hace vibrar una cuerda que está sujeta en ambos extremos, se debe considerar que la variable independiente en este caso será la frecuencia, ya que es el valor que se estará modificando, y la variable dependiente sería la longitud de onda, ya que depende de la frecuencia a la que se transmita la onda en la cuerda.

Al realizar la gráfica de cada frecuencia con su correspondiente longitud de onda, el resultado es el mostrado en la figura 7.9.

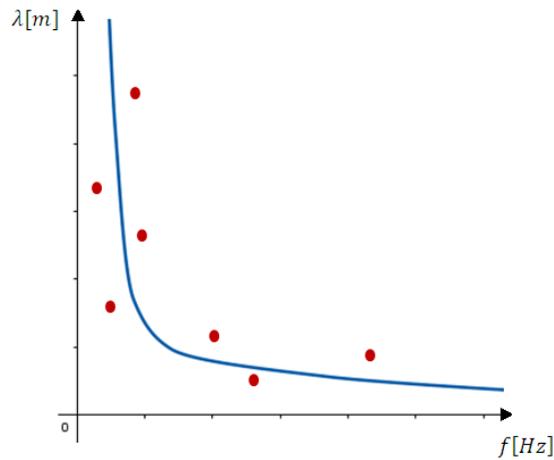


Figura 7.9. Gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia

Observamos que la tendencia de los puntos no es lineal. La gráfica obtenida se le conoce como hipérbola equilátera. Para obtener el modelo matemático, conviene que el conjunto de puntos tenga una tendencia lineal. Para lograr esto, podemos utilizar el periodo en lugar de la frecuencia. Recordemos que el periodo es el inverso de la frecuencia, es decir:

$$T = \frac{1}{f}$$

Entonces, si cada frecuencia la trabajamos como periodo y posteriormente lo asociamos con su correspondiente longitud de onda, como se muestra en la figura 7.10.

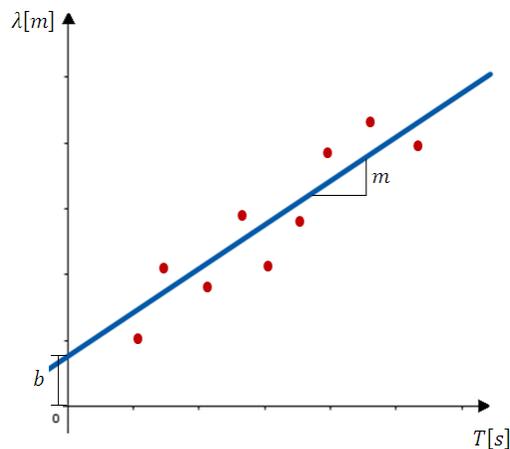


Figura 7.10. Gráfica de la longitud de onda en función de su periodo asociado.

Observamos que, en esta ocasión, la gráfica resultante sí tiene tendencia lineal. Mediante el método de la suma de los cuadrados mínimos, podemos obtener la ecuación que describe el comportamiento de la recta que representa al conjunto de puntos. El modelo matemático de la longitud de onda en función del periodo quedaría representado por:

$$\lambda[\text{m}] = \eta \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] T[\text{s}] + b[\text{m}]$$

La ordenada al origen es un error que existe al medir la distancia entre nodo y nodo. EL error es muy pequeño, por lo que el modelo matemático lo podemos aproximar a la siguiente expresión:

$$\lambda[\text{m}] \approx \eta \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] T[\text{s}]$$

Si comparamos el modelo matemático con la ecuación que relaciona la longitud de onda y el periodo de una onda, tenemos lo siguiente:

$$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{\lambda [\text{m}]}{T [\text{s}]}$$

Despejando la longitud de onda, tenemos lo siguiente:

$$\lambda [\text{m}] = v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] T[\text{s}]$$

Al comparar el modelo teórico con el modelo experimental, observamos que la pendiente es igual a la rapidez de propagación de la onda, es decir:

$$\eta = v [\text{m/s}]$$

Para comprobar lo anterior, mediante el dispositivo experimental mostrado en la figura 7.11 y con el uso de una cuerda se harán distintas pruebas para poder calcular experimentalmente la longitud de onda y la frecuencia de la cuerda a partir de sus modos de vibración, los cuales se lograrán con ayuda del impulsor de ondas.

Las pruebas consisten en: primero tensar la cuerda con 300 [g] de masa para así después excitarla con el generador de señales con un valor mínimo de 2[Hz], el cual se irá incrementando lenta y suavemente hasta lograr los modos de vibración deseados.

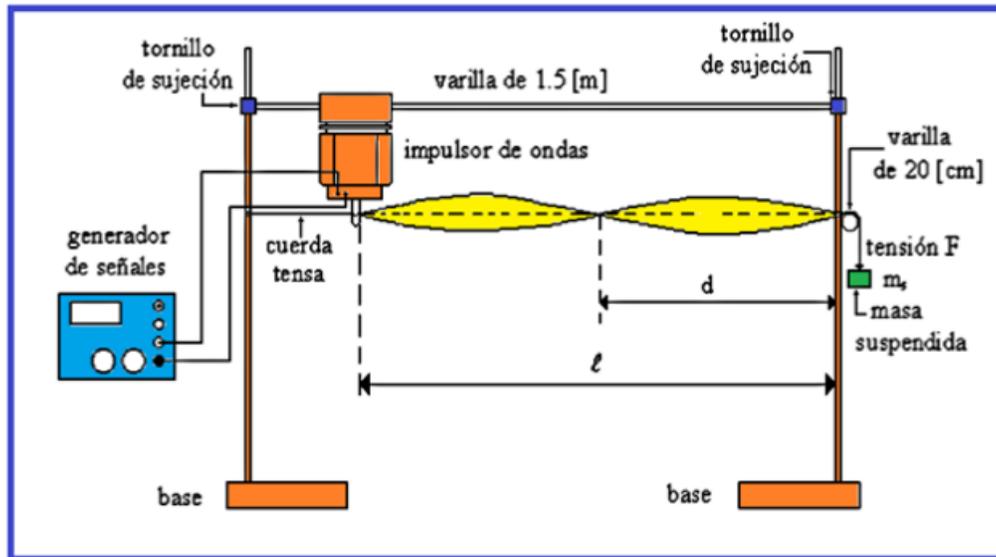


Figura 7.11. Dispositivo experimental para calcular longitud de onda y frecuencia en la cuerda.

Para cada uno de los modos de vibración que se muestran en la tabla 1, se tomarán las lecturas de la frecuencia utilizada, así como la distancia entre los modos de vibración con el fin de obtener la longitud de onda y el periodo de la señal en la cuerda, como se muestra en la figura 7.12.

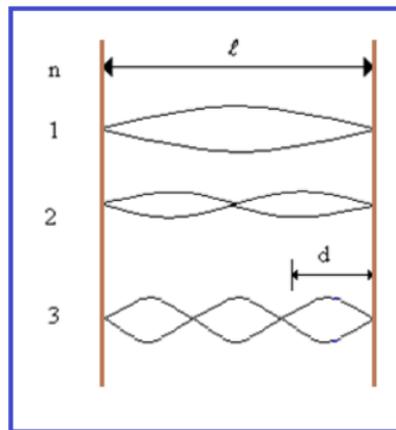


Figura 7.12. Ejemplos de ondas estacionarios.

Como se observa, la cuerda a utilizar en la práctica tiene una longitud L que fija en los extremos tendrá un conjunto de modos normales de vibración, cada uno con una frecuencia característica. Las frecuencias se pueden calcular fácilmente.

En primer lugar, los extremos de la cuerda deben de ser nodos ya que estos puntos se encuentran fijos. El primer modo de vibración será aquél en el que la longitud de la cuerda sea igual a media longitud de onda $L = \lambda/2$. Para el segundo modo de vibración, la longitud de la cuerda será igual a una longitud de onda, $L = \lambda$. Para el tercer modo, $L = 3\lambda/2$, y así sucesivamente. En consecuencia, la longitud de onda de los diferentes modos de vibración se puede expresar como

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

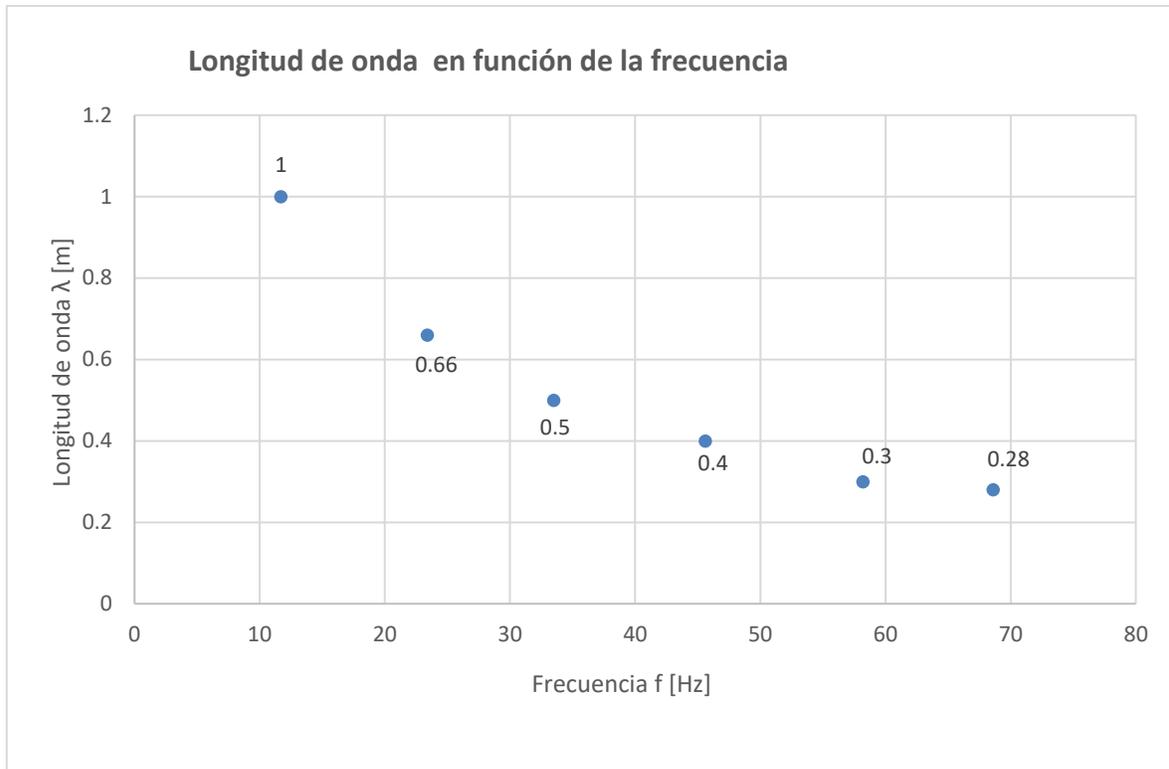
Tabla 1. Tabulación de datos

Modo de vibración	Frecuencia [Hz]	Distancia d [m]	Longitud λ [m], $\lambda = 2d *$	Periodo T[s]
1	11.7	0.5	1	0.0854
2	23.4	0.33	0.66	0.0427
3	33.5	0.25	0.5	0.02987
4	45.6	0.2	0.4	0.0219
5	58.2	0.16	0.3	0.0171
6	68.6	0.14	0.28	0.014

Nota: *d es la distancia entre nodos.

A continuación, se muestra el comportamiento de la longitud de onda en función de su frecuencia, gráfica 1.

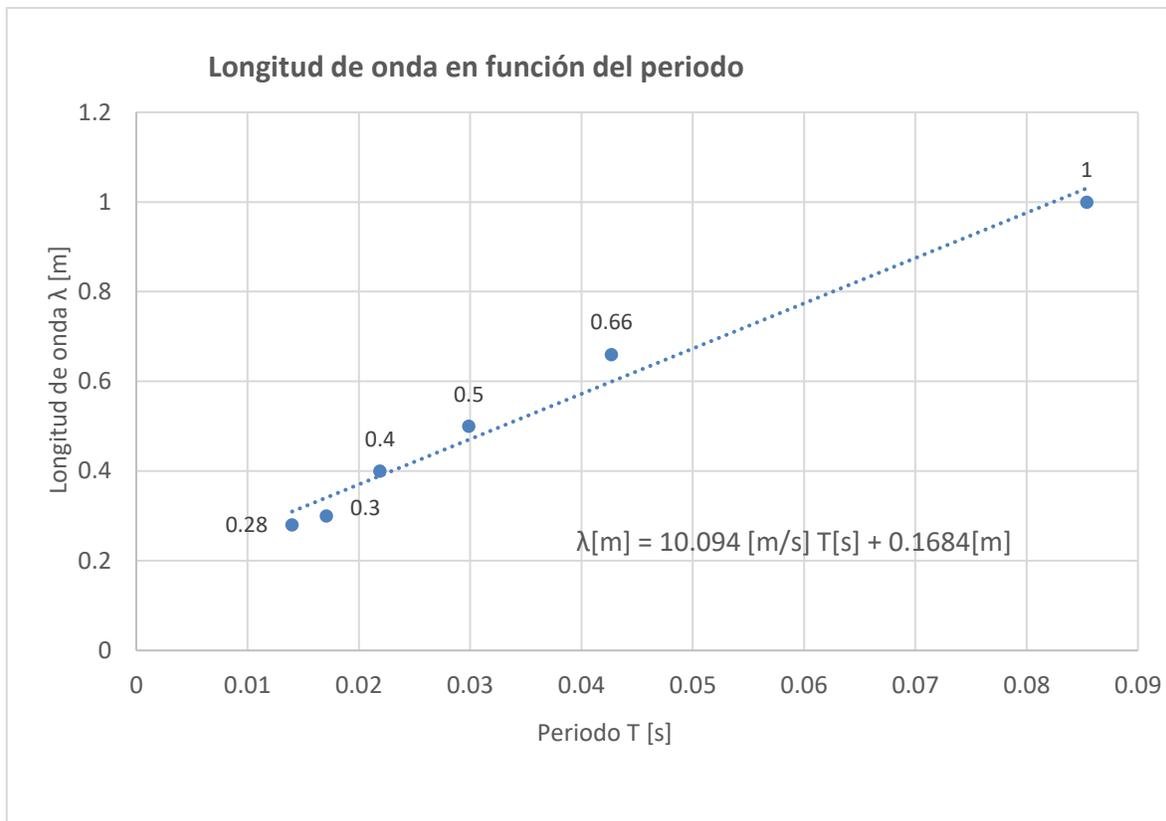
Longitud de onda λ [m]	Frecuencia [Hz]
1	11.7
0.66	23.4
0.5	33.5
0.4	45.6
0.3	58.2
0.28	68.6



Gráfica 1. Comportamiento de la longitud de onda en función de la frecuencia.

Como se puede observar la gráfica de longitud de onda en función de la frecuencia no representa una línea recta, por lo tanto, se tiene que hacer un cambio de variable y esto lo logramos, trabajando con el período, es decir el inverso de la frecuencia, ver gráfica 2.

Longitud de onda λ [m]	Periodo [s]
1	0.0854
0.66	0.0427
0.5	0.02987
0.4	0.0219
0.3	0.0171
0.28	0.014



Gráfica 2. Comportamiento de la longitud de onda en función del periodo.

7.3 Ecuación de una línea recta que represente los valores experimentales. Significado físico de la pendiente de la recta obtenida.

Con respecto al periodo, la longitud de onda es directamente proporcional y, por tanto, la gráfica resultante puede modelarse con la ecuación de la recta y empleando el método de la suma de los cuadrados mínimos. La ecuación de la recta obtenida en la gráfica 2 es:

$$\lambda[\text{m}] = 10.0935 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] T[\text{s}] + 0.168425[\text{m}]$$

donde la pendiente representa la velocidad de propagación de la onda en la cuerda, por lo tanto:

$$\text{velocidad de propagación} = 10.0935[\text{m/s}]$$

7.4 Prueba del modelo y su aplicación en la solución de problemas de movimiento ondulatorio.

Se recomienda al alumno consultar el cuaderno de ejercicios de Física Experimental, donde se presenta un conjunto de ejercicios resueltos y otro de ejercicios propuestos en los que podrá

practicar y resolver reactivos donde se emplean los modelos matemáticos fundamentales del movimiento ondulatorio.

Este material se encuentra disponible en la siguiente dirección electrónica:

<https://dcb.ingenieria.unam.mx/wp-content/themes/temperachild/CoordinacionesAcademicas/FQ/Documentos/Series/CUADERNO-EJERCICIOS-FE.pdf>

Bibliografía:

- I. *Módulo II: Ondas*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2012. Formato: .pdf. Disponible en: <http://www.fisica.edu.uy/~cris/teaching/ondas_parte1_2012.pdf>.
- II. WHITE, Glen. *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima Dli. Formato: .pdf. Disponible en: <<http://www.youblisher.com/p/469357-Introduccion-al-Analisis-de-Vibraciones>>.
- III. AGUIRRE, Elizabeth, et al. *Manual de prácticas de Laboratorio de Física Experimental*. Disponible en: <<http://dcb.ingenieria.unam.mx/index.php/coordinaciones/fisica-quimica/fisica/fisica-experimental>>.