

EXPERIMENTO 8

Experimento demostrativo: Ondas mecánicas en la superficie del agua

Objetivos

- * Estudiar la propagación de ondas mecánicas en la superficie del agua de una cubeta de ondas.
- * Observar el efecto de la tensión superficial y la profundidad sobre la propagación de las ondas en aguas superficiales.
- * Observar algunos fenómenos “ópticos” de las ondas en aguas superficiales.

Teoría

Al igual que las ondas mecánicas se propagan en medios sólidos y gases, también lo hacen en medios líquidos como el agua. En un líquido, las perturbaciones producen desplazamientos colectivos de las moléculas; el movimiento es controlado por fuerzas como la gravedad, la tensión superficial y la fricción interna (viscosidad). Estas fuerzas se encargan de poner al líquido en su estado de equilibrio. Si la perturbación se mantiene con el tiempo, el resultado es una onda mecánica propagándose tanto en la dirección transversal como longitudinal. La combinación de estas formas de propagación se debe a la incompresibilidad del agua, porque el líquido acumulado en un máximo (cresta), viene de las regiones vecinas donde el líquido está ausente en un mínimo. De esta manera cualquier molécula en la superficie del líquido se mueve a lo largo de la dirección de propagación (hacia adelante y hacia atrás) y perpendicular a ella (hacia arriba y hacia abajo). Las moléculas que están por debajo de la superficie en promedio no se desplazan, pero si realizan pequeños movimientos circulares o elípticos dependiendo de su profundidad.

Teóricamente es posible ignorar los efectos de la fricción asociados a la viscosidad del líquido, con el fin de determinar la velocidad de fase de las ondas en un líquido ideal. En el caso más general se puede considerar la propagación en

una cubeta o en un canal. En el primero las ondas son estacionarias debido a las fronteras y en el segundo, las ondas son progresivas en la dirección donde no hay fronteras¹. En cualquier caso y con buena aproximación, las ondas pueden clasificarse en ondas dispersivas o no dispersivas, según la relación entre la profundidad h del líquido y la longitud de onda λ de la onda propagada.

En un canal largo (o en una cubeta) de profundidad h , la velocidad de fase de las ondas en un líquido está dada por,

$$v = \sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi} \left(1 + \frac{\tilde{\lambda}^2}{\lambda^2}\right) \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (8.1)$$

donde $\tilde{\lambda} = 2\pi\sqrt{\frac{\gamma}{g\rho}}$ es la longitud de onda característica asociada a la interfase gas-líquido, ρ es la densidad del líquido, γ su tensión superficial y g la aceleración de la gravedad. En el caso de la interfaz aire-agua a presión atmosférica $\tilde{\lambda} = 1.71\text{cm}$.

Según el valor de la profundidad, las ondas pueden ser: de aguas superficiales (baja profundidad) o de aguas profundas (alta profundidad)². Además, según el valor de $\frac{\tilde{\lambda}}{\lambda}$ las ondas están dominadas por la tensión superficial o por la fuerza de gravedad. En particular, si $\frac{\tilde{\lambda}}{\lambda} \gg 1$, las ondas reciben el nombre de *ondas capilares*, pero si $\frac{\tilde{\lambda}}{\lambda} \ll 1$, las ondas reciben el nombre de *ondas de gravedad*.

Usando el resultado de la ecuación 8.1 determine una ecuación para la velocidad de fase de las ondas capilares de aguas profundas ($\lambda \ll \tilde{\lambda} \ll h$) y la velocidad de fase de ondas de gravedad de aguas profundas ($\tilde{\lambda} \ll \lambda \ll h$).

¹Las ondas estacionarias en un líquido también poseen un conjunto de modos normales de oscilación. Cada uno de ellos se puede observar dependiendo de las condiciones físicas de la perturbación externa sobre el líquido.

²Las ondas de aguas profundas son dispersivas, mientras que las de aguas superficiales son no dispersivas. Puede determinar cada caso de la relación de dispersión $\omega(k)$.

¿Las ondas en una cubeta se pueden considerar ondas superficiales capilares o ondas superficiales de gravedad?. Obtenga una expresión para este caso. ¿Es importante la tensión superficial?.

Precauciones

- * No deje caer agua de la cubeta a los equipos electrónicos.
- * Procure mantener la tensión por debajo de 12V y una corriente por debajo de 5A durante el funcionamiento de la unidad de control y la lámpara del estroboscopio. Si no respeta los límites de tensión y corriente, la unidad y la lámpara pueden dañarse.
¡Cuidado!. El estroboscopio se calienta durante su funcionamiento.
- * Tenga cuidado de no romper las piezas de vidrio que tiene la cubeta.

Equipo

- * Cubeta de ondas 3B SCIENTIFIC® con sus accesorios, fuente de alimentación de 12V, 5A, agua, jabón líquido, papel milimetrado, calibrador.
- * Cámara fotográfica (los estudiantes pueden usar la cámara de sus teléfonos móviles).

Preparación

A continuación se mencionan algunos detalles sobre seguridad, características, manejo y generación de ondas con el modelo de cubeta disponible en el laboratorio Figura 8.1. La siguiente información fue recopilada del manual de usuario del equipo: *Cubeta para ondas U21910 de 3B SCIENTIFIC*³.

El profesor debe preparar previamente las dos cubetas de ondas disponibles en el laboratorio. Una de ellas para generar ondas con frentes de onda circulares y otra para generar frentes de onda rectilíneos. La mitad de los grupos del curso realiza los experimentos con ondas circulares, mientras la otra mitad con las ondas rectilíneas, luego se intercambian los roles de tal forma que todos los estudiantes puedan observar los experimentos.

Características

La cubeta para ondas consta de un marco de aluminio (12), en el que se encuentra un depósito plano con fondo de vidrio (13). En el fondo de vidrio hay una apertura (20) con tubo flexible de salida (21) y una pinza para la manguera (23) que permite la salida del agua. Con el fin de realizar una nivelación horizontal, la cubeta está equipada con un nivel de burbuja (9) y 2 pies niveladores (11). En el marco hay un espejo de orientación oblicua y extraíble (14), mediante el cual se proyectan las ondas sobre una pantalla de vidrio mate (10). Una lámpara halógena, con un estroboscopio (17), la cual ilumina la caja desde arriba. La generación de las olas se realiza mediante la transmisión de las vibraciones de un vibrador electromagnético (19) a los generadores de ondas (3, 4), que se fijan mediante dos tornillos moleteados (18). Para la realización de los ensayos, se dispone de un obstáculo (7) y de elementos insertables (6). Las placas de cubierta (1, 2) sirven para construir rejillas con distintas anchuras de espacios intermedios y una pared reflectora.

En la unidad de control (22), se pueden regular por separado la frecuencia del estroboscopio y la frecuencia y la amplitud del vibrador. Las frecuencias del estroboscopio y del vibrador se pueden regular de manera que el estroboscopio y el vibrador operen de forma sincronizada o asíncrona (27). Para medir la frecuencia del vibrador se han previsto clavijeros de seguridad de 4 mm (29) para conectar un contador o un osciloscopio. La conexión del estroboscopio se realiza a través de un conector hembra multipolar (31) y la del vibrador mediante clavijeros de seguridad de 4 mm (30) ubicados en la parte posterior de la unidad de control.

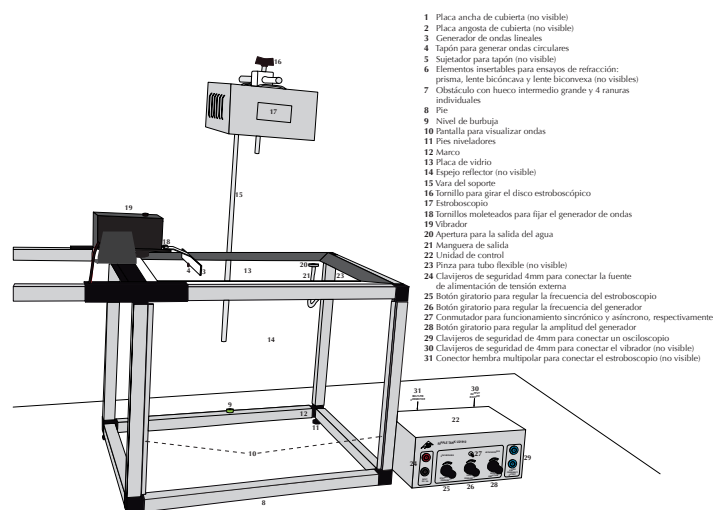


Figura 8.1

³Este manual está disponible en el laboratorio o en internet.

Manejo

Para el funcionamiento de la cubeta de ondas se requiere adicionalmente una fuente de alimentación de corriente continua de 12V, 5A.

- * Colocar la cubeta de ondas sobre una base horizontal no susceptible a vibraciones.
- * Alinear la caja de ondas de forma horizontal mediante los 2 pies de nivelado y el nivel de burbuja.
- * Insertar el espejo reflector completamente en el marco. Éste no se fija, sino que sólo queda emplazado.
- * Instalar el tubo flexible (manguera) de salida en la placa de vidrio y estrangularlo con la pinza para tubo flexible.
- * Instalar el tubo flexible de salida en la placa de vidrio y estrangularlo con la pinza para tubo flexible.
- * Atornillar el estroboscopio en la vara del soporte.
- * Se conecta la unidad de control a la fuente de alimentación de CC y otra conexión entre la unidad de control y el estroboscopio.
- * La tensión de salida se ajusta a $< 12V$ y la corriente de salida se limita a $< 5A$; al principio se selecciona una frecuencia de estroboscopio igual a cero.
- * El disco del estroboscopio se gira de tal forma que la incidencia de la luz sea máxima y se orienta el estroboscopio en su posición altura de tal forma que la cubeta de ondas quede totalmente iluminada.
- * Colocar el vibrador sobre el marco de la caja de ondas. Las piezas o accesorios adicionales necesarias para los experimentos que se va a realizar deben fijarse en el vibrador mediante los tornillos moleteados.
- * Conectar el vibrador a la unidad de control.
- * Llenar de agua destilada la cubeta. Para ensayos de refracción hasta aproximadamente 1mm por encima de los elementos insertables, para otros ensayos aproximadamente 4mm o 5mm.
- * Después de los ensayos o experimentos, la cubeta debe vaciarse a través del tubo flexible (manguera) de salida.
- * Secar bien el aparato para evitar la permanencia de residuos.
- * Para crear una pared reflectora o rejillas con distintas anchuras de rendijas, las placas de cubierta deberán fijarse en la placa del obstáculo mediante una goma de uso doméstico o con cinta de papel.

Generación de ondas circulares y rectilíneas

Deberá elegirse cuidadosamente la profundidad del agua, la profundidad de inmersión de los generadores de ondas así como la frecuencia y la amplitud del vibrador, con el fin de optimizar la visualización de los fenómenos.

Teniendo sincronizadas la frecuencia del vibrador y del estroboscopio se pueden realizar cuadros o distribuciones de ondas estacionarias. Si se modifica la frecuencia, puede que sea necesario reajustar la amplitud.

En algunos ensayos (difracción y reflexión) puede que sea necesario aumentar la nitidez de determinadas áreas de la imagen ondulatoria. Para tal efecto, se debe modificar la amplitud.

Por último, puede agregar jabón líquido al agua de la cubeta para visualizar mejor la proyección de las ondas en la pantalla. El jabón disminuye la tensión superficial del agua.

Ondas rectilíneas

- * Fijar el generador de ondas de mayor longitud en el vibrador mediante los tornillos moleteados.
- * Seleccionar la profundidad de inmersión mediante regulación del vibrador de tal manera que el borde inferior del generador apenas toque la superficie del agua.
- * Graduar la frecuencia y la amplitud deseadas en la unidad de control.
- * En la pantalla de observación se crea una imagen ondulatoria quieta o de movimiento lento. Realizar el ajuste fino con el botón de frecuencia.

Ondas circulares

- * Para establecer una fuente de ondas circulares, elegir uno de los tapones y ejercer presión contra el filo del generador de ondas. Si desea agragar más fuentes de ondas ponga otros tapones a la misma distancia.
- * Fijar el generador de ondas largo en el vibrador mediante los tornillos moleteados.
- * Seleccionar la profundidad de inmersión mediante regulación del vibrador de tal manera que el borde inferior del tapón apenas toque la superficie del agua.
- * Graduar la frecuencia y la amplitud deseadas en la unidad de control.
- * En la pantalla de observación se crea una imagen ondulatoria quieta o de movimiento lento. Realizar el

ajuste fino mediante el botón giratorio regulador de frecuencia.

Para determinar la longitud de onda debe considerarse el factor de aumento b . El factor de aumento b se puede calcular, por ejemplo, si se coloca la lente bicóncava (o cualquier objeto) encima de la caja de ondas y se saca la proporción de su tamaño A con respecto al tamaño de su imagen en la pantalla de observación A' , esto es: $b = \frac{A'}{A}$.

A partir de la longitud de onda λ' , medida en la pantalla de observación, se obtiene la longitud de la onda real $\lambda = \frac{\lambda'}{b}$.

Procedimiento

Primera parte

1. Frentes de onda circulares

- * Fijar el generador de ondas lineales en el vibrador.
- * Colocar el tapón en el centro.
- * Desplazar el vibrador de tal manera que el tapón quede en el centro de la cubeta.
- * Profundidad del agua en la cubeta de ondas aproximadamente de 4mm.
- * Alinear la altura del tapón con la superficie del agua (recuerde que apenas debe tocarla).
- * Fije el regulador de frecuencia en ajuste sincrónico; fijar en aproximadamente 20Hz.
- * Buscar la mejor imagen con el regulador de amplitud.
- * Conseguir que las imágenes de las ondas “se detengan”, mediante un cambio fino de frecuencia.

2. Reflexión de una onda circular en una pared lisa

- * Una vez tenga las ondas circulares, coloque la placa plano paralela a una distancia de aproximadamente 5cm del generador. Primero, paralela a la pared izquierda de la cubeta de ondas y segundo, a un ángulo de 45°.
- * Realizar el ajuste fino de la frecuencia y de la amplitud hasta que la reflexión se haga claramente visible.

3. Refracción de una onda circular sobre una lente biconvexa

- * Deslice el vibrador para que actúe a una distancia de 5cm del borde de la cubeta.

- * Realizar el ajuste fino de la frecuencia y de la amplitud hasta que se vea bien claro que las ondas circulares se convierten en ondas lineales detrás de la lente. Luego, ponga la lente bicóncava delante de la lente biconvexa y observe las ondas después de esta.

Recuerde verter agua hasta que los cuerpos de inmersión (prisma, lente bicóncava y lente biconvexa) estén completamente sumergidos (profundidad del agua aproximadamente de 5.5mm a 6.0mm).

4. Superposición de dos ondas circulares

- * Colocar un tapón adicional en el generador lineal. De este modo se obtienen dos fuentes coherentes de ondas circulares.
- * Desplazar el vibrador de tal manera que los tapones estén en el centro de la cubeta.
- * Observar el aspecto de la superposición con diferentes distancias entre los tapones.

5. Efecto Doppler ($v_f < v_o$)

- * Vuelva a configurar la fuente de ondas circulares colocando un solo tapón en el centro del generador lineal.
- * Realizar el ajuste fino de la frecuencia y de la amplitud hasta que la onda circular sea bien visible.
- * Deslice suavemente el vibrador hacia la derecha y la izquierda sobre la cubeta de ondas y observe el cambio en la longitud de onda de las ondas circulares en el agua.

Segunda parte

1. Frentes de onda rectilíneos

- * Alinear el generador de ondas lineales en la superficie del agua (profundidad del agua aproximadamente 4mm).
- * Desplazar el vibrador de tal forma que el generador actúe completamente al borde de la cubeta de ondas.
- * Alinear la altura del generador con la superficie del agua (recuerde que apenas debe tocarla).
- * Fije el regulador de frecuencia en ajuste sincrónico; fijar en aproximadamente 20Hz.
- * Buscar la mejor imagen con el regulador de amplitud.
- * El ajuste fino de la frecuencia permite obtener una “imagen estática” de las ondas estacionarias.

2. Reflexión de una onda rectilínea o lineal en una pared lisa

- * Luego de ajustar la fuente de ondas rectilíneas, colocar la placa plano paralela a una distancia de 5cm a 10cm del generador a un ángulo de 45° con respecto a los frentes de ondas.
- * Realizar el ajuste fino de la frecuencia y de la amplitud hasta que la reflexión se haga claramente visible.

3. Reflexión de una onda lineal en un espejo cóncavo

- * Luego de ajustar la fuente de ondas rectilíneas, colocar el obstáculo con la ranura grande de forma paralela a los frentes de ondas y delante del generador.
- * Colocar el cuerpo bicóncavo delante de la ranura (recuerde que el cuerpo debe sobresalir del agua).
- * Realizar el ajuste fino de la frecuencia y de la amplitud hasta que el “efecto convergente” se vuelva perfectamente visible.
- * Sustituir el cuerpo bicóncavo por el cuerpo biconvexo y observar el “efecto divergente” de las ondas reflejadas.

4. Refracción de una onda lineal a través de un prisma

- * Sustituir las lentes por el prisma y proceder del mismo modo que en los experimentos de refracción con ondas circulares.
- * Observar el cambio de la dirección de propagación de los frentes de onda.

5. Velocidades de propagación en aguas profundas y superficiales

- * Verter agua hasta que los cuerpos de inmersión estén completamente sumergidos (profundidad del agua aprox. 5.5mm a 6.0mm).
- * Variar la altura del generador para que apenas toque la superficie del agua.
- * Garantizar una buena tensión superficial (puede añadir unas gotas de jabón), para observar fácilmente las ondas sobre la superficie del agua.
- * Sumergir la placa plano paralela con su lado estrecho paralela a los frentes de onda. Por encima de la placa, la profundidad es menor que a un lado de ella. Observe la proyección de las longitudes de onda e identifique en que profundidad la velocidad de propagación de las ondas es menor o mayor.

6. Interferencia en múltiples ranuras

- * El generador lineal debe actuar en el borde de la cubeta de ondas.
- * Colocar el obstáculo con cuatro ranuras individuales, paralelo al generador lineal.
- * Ajustar la frecuencia de tal manera que se produzcan longitudes de onda de mayor ancho que las ranuras.
- * Realizar el ajuste fino de la frecuencia y de la amplitud hasta que la superposición de ondas (interferencia constructiva y destructiva) se vea claramente sobre la pantalla.
- * Usar las placas disponibles para tapar las ranuras de los extremos del obstáculo, de este modo se puede observar la interferencia de dos ranuras. Para pegar estas placas al obstáculo use cinta de papel o goma.