

ONDAS ESTACIONARIAS Y EFECTO DOPPLER EN ONDAS DE ULTRASONIDO

Objetivos

1. Caracterización de una onda estacionaria ultrasónica.
2. Determinación de la velocidad de la onda
3. Estudio del efecto Doppler

Teoría

De acuerdo a su naturaleza física existen varios tipos diferentes de ondas. Las ondas mecánicas consisten en la propagación de energía a través de la materia mediante el movimiento regular y constante de una perturbación que avanza a través de ésta sin que haya un movimiento de masa en la materia misma. En las ondas electromagnéticas o luminosas la perturbación viaja a la velocidad de la luz y no es un movimiento de materia sino un campo electromagnético el cual no necesita de medio para su propagación.

En esta práctica enfocaremos nuestra atención en las ondas ultrasónicas las cuales son un tipo particular de ondas mecánicas con una frecuencia superior a las detectables por el oído humano (>20 kHz). El medio que transmite las ondas mecánicas (ej. aire) debe ser inercial y elástico para originar las fuerzas restauradoras que obran sobre una porción cualquiera del medio que esté fuera de su posición de equilibrio.

Las ondas ultrasónicas, sónicas e infrasónicas son longitudinales, es decir, el movimiento de las partículas de la materia que transporta la onda está en la dirección de la propagación de ésta. En contraste a la propagación de una onda en una cuerda horizontal sometida a tensión donde el movimiento de las partículas y la dirección de propagación de la onda son perpendiculares (ondas mecánicas transversales).

De acuerdo a la duración de la perturbación de una onda podemos "hablar" de:

- 1) **Impulso:** Cuando se produce una sola perturbación en un instante de tiempo dado.
- 2) **Tren de onda:** Cuando la perturbación dura un tiempo largo.

Ondas Estacionarias longitudinales:

Las expresiones que caracterizan a una sola onda longitudinal (ultrasónica) en el caso de una oscilación armónica simple desplazándose de izquierda a derecha (y^+) y de derecha a izquierda (y^-) son:

$$y^+ = y_m \cos(kx - \omega t) \quad (1a)$$

$$y^- = y_m \cos(kx + \omega t) \quad (1b)$$

donde y representa el desplazamiento de las partículas de aire desde su posición de equilibrio a lo largo del eje x , y_m corresponde a la amplitud de la onda (también a lo largo del eje x), x a la dirección de propagación y t al tiempo. El número de onda k y la frecuencia angular ω están dados por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2a)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2b)$$

siendo λ la longitud de la onda y T el período de esta.

Universidad Simón Bolívar
FS2282, Laboratorio de Física 3

De acuerdo al principio de superposición podemos obtener ondas estacionarias si sumamos ondas de igual amplitud, frecuencia y velocidad que viajan en sentido contrario para obtener:

$$y = 2 y_m \cos kx \cos \omega t \quad (3)$$

Esta última ecuación es la llamada ecuación de onda estacionaria la cual presenta varias características importantes:

- 1.- Todas las partículas vibran a la misma frecuencia ω
- 2.- Una partícula en cualquier punto x en la dirección de propagación y en todo tiempo t , ejecuta un movimiento armónico simple, ya que (3) puede describirse como:

$$y = y'_m \cos \omega t \quad (4)$$

- 3.- La amplitud de la onda estacionaria y'_m está dada por:

$$y'_m = 2 y_m \cos kx \quad (5)$$

lo que lleva a la conclusión de que la amplitud de oscilación de las partículas en diferentes posiciones x , es diferente, ya que la amplitud y'_m es una función de x .

- 4.- La amplitud de la onda de ultrasonido es máxima para:

$$kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (6)$$

es decir, para valores de x dados por:

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, 2\lambda, \dots \quad (7)$$

ya que: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Estos puntos de máxima amplitud reciben el nombre de "antinodos" o "vientres" y se encuentran separados por una distancia de media longitud de onda.

- 5.- La amplitud tiene un valor mínimo, de cero, en:

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots \quad (8)$$

ya que $\cos kx$ se anula para estos valores. Los valores de x donde esto ocurre son:

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots \quad (9)$$

y reciben el nombre de "nodos" estando separado por media longitud de onda.

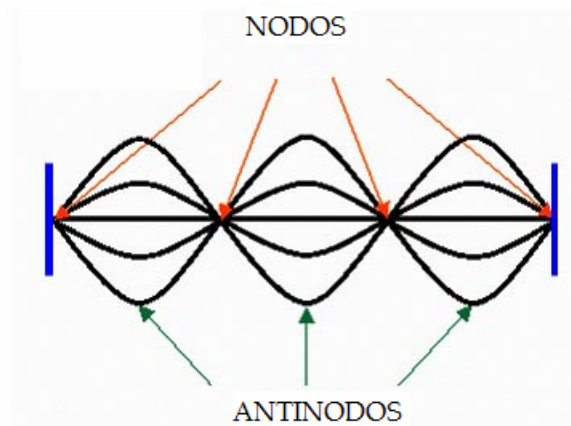


Figura 1. Representación de una onda estacionaria.

- 6.- Los nodos y antinodos o vientres se refieren a los desplazamientos de las partículas de la onda estacionaria. En un nodo de desplazamiento las variaciones de presión por encima y debajo de la presión media son máximas. Por consiguiente un nodo de desplazamiento corresponde a un antinodo de presión. En un antinodo de desplazamiento no hay variación de presión, por consiguiente, un antinodo de desplazamiento corresponde a un nodo de presión.

Universidad Simón Bolívar FS2282, Laboratorio de Física 3

Esto se puede entender físicamente dándose cuenta de que dos pequeños elementos de gas en los lados opuestos de un nodo de desplazamiento están vibrando en fases opuestas. Por lo tanto, cuando se aproximan, la presión en ese nodo es máxima y cuando se alejan entre sí, la presión en ese nodo es mínima. Dos pequeños elementos de gas que se encuentran en lados opuestos de un antinodo de desplazamiento vibran en fase y por consiguiente no dan lugar a variaciones de presión en el antinodo.

Efecto Doppler

Efecto Doppler se llama a los fenómenos ondulatorios que ocurren cuando una fuente de ondas y un observador se encuentran en movimiento relativo. En el caso de ondas acústicas se observa que la frecuencia de la onda percibida por un observador y la frecuencia de la señal emitida por una fuente no son en general iguales si la fuente, el observador o el medio posee un movimiento relativo.

Supongamos un observador en movimiento con la velocidad v_o y una fuente de ondas ultrasónicas en movimiento con velocidad v_f , ambas en el eje x . Usando la convención de que las velocidades positivas corresponden al sentido positivo del eje x (hacia la derecha), que el observador se encuentra en el origen y la fuente de ondas en algún punto positivo del eje x , (ver figura 2) la frecuencia f_o que percibe el observador está dada en términos de la frecuencia f_f de la fuente mediante:

$$f_o = f_f \left(\frac{c + v_o}{c + v_f} \right) \quad (10)$$

donde c es la velocidad del sonido en el aire. Recordemos que la velocidad del sonido se obtiene a partir de la longitud de onda y de la frecuencia con: $c = \lambda f$

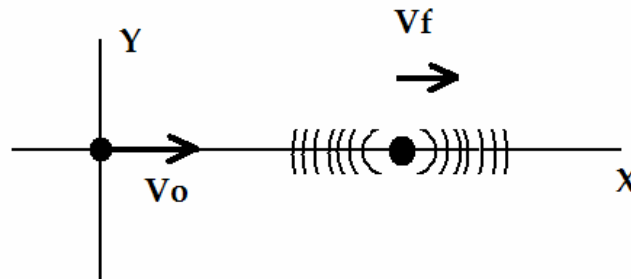


Figura 2. Observador en el origen y una fuente de sonido

Si el aire se mueve el efecto es de alterar la velocidad efectiva del sonido. Suponiendo que el aire se mueva con velocidad, v_a de izquierda a derecha: la velocidad efectiva del sonido, c_e , entre la fuente y el observador es:

$$c_e = c - v_a$$

Por lo tanto al substituirse c en la relación anterior por la expresión de la velocidad efectiva, se obtiene:

$$f_o = f_f \left(\frac{c - v_a + v_o}{c - v_a + v_f} \right) \quad (11)$$

Esta relación predice la frecuencia percibida por el observador en función de la frecuencia de la fuente y de las velocidades de la fuente, el observador, el aire y el sonido.

Observe que si la velocidad del observador v_o o de la fuente v_f no son cero, la velocidad del aire hace que la frecuencia percibida sea diferente a la de la fuente. En cambio si v_o y v_f son nulos, la velocidad del aire no modifica la frecuencia. En este último caso los cambios en la velocidad del aire tienen el efecto de alterar la fase de

Universidad Simón Bolívar
FS2282, Laboratorio de Física 3

la onda recibida por el observador, permaneciendo la frecuencia constante. En la experiencia a realizar se mide este cambio de fase lo cual permite determinar la velocidad del aire. Considérese el transmisor y el receptor separados una distancia l sobre el eje x , y que inicialmente la velocidad del aire v_a es cero.

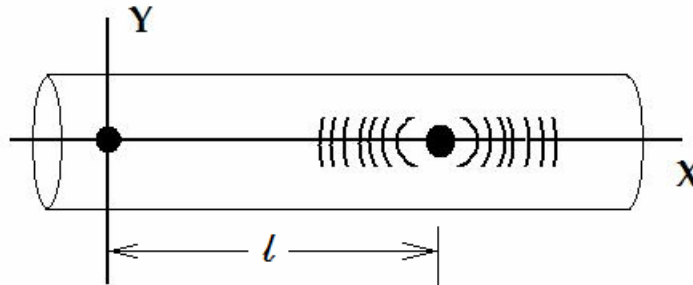


Figura 3 Observador y fuente de sonido, separados una distancia l dentro de un tubo, donde se puede mover el aire en el eje $-X$

Siendo c la velocidad del sonido en el aire y t el tiempo que tarda el sonido en viajar del emisor al receptor se tiene que:

$$c = \frac{l}{t} \quad (12)$$

Movimiento del aire:

Si la velocidad del aire v_a (en dirección al receptor) es diferente de cero, la velocidad efectiva c_e del sonido entre la fuente y el receptor estará dada por:

$$c_e = c + v_a \quad (13)$$

Ecuación que, al despejar v_a , sustituir c y c_e por expresiones análogas a la ecuación (12), se obtiene:

$$v_a = \frac{1}{t'} - \frac{1}{t} \quad (14)$$

Donde t' es el tiempo que tarda la onda sonora en recorrer la distancia l cuando $v_a \neq 0$.

Rescribiendo la ecuación anterior en términos de t y Δt ($\Delta t = t - t'$) se obtiene que:

$$v_a = \frac{1}{t - \Delta t} - \frac{1}{t} = \frac{1\Delta t}{(t - \Delta t)t} \quad (15)$$

Ecuación que, expresada (con ayuda de la ecuación 12) en función de las variables c , l y Δt toma la forma

$$v_a = \frac{ct}{\frac{1}{c} - \Delta t} \quad (16)$$

Con la fuente y el receptor fijos $v_f = v_o = 0$ substituidos en la expresión (11) $f_o = f_f \left(\frac{c - v_a + v_o}{c - v_a + v_f} \right)$

obtenemos $f_o = f_f$ es decir no cambia la frecuencia. Pero en cambio hay un corrimiento de fase que refleja el hecho de que la velocidad efectiva c_e del sonido dentro del tubo es mayor y la onda tarda menor tiempo en llegar al receptor. Si la diferencia de tiempo es $\Delta t = t - t'$, siendo t el tiempo de la onda con $v_a = 0$ y t' el tiempo con $v_a \neq 0$ entonces la velocidad del aire se deduce que es:

$$v_a = \frac{ct}{\frac{1}{c} - \Delta t}$$

Δt se mide en el osciloscopio observando el corrimiento de fase que ocurre al encender y apagar el aire

Experiencia¹

Parte A.- Sintonizar el transmisor y el receptor:

Para la mayor parte de la experiencia es necesario que el transmisor y el receptor se encuentren, adecuadamente, sintonizados. Este es un ajuste interno del instrumento que ya está hecho. En caso de que sea necesario reajustar la sintonía, se siguen los siguientes pasos:



FIGURA 4. Trasmisor T y receptor R en posición para sintonizarlos.

- Colocar el receptor y transmisor Uno en frente al otro en la geometría indicada en la figura 4.
- Cambiar la frecuencia del transmisor mediante el control (Control interno SINT) hasta obtener la máxima señal en el receptor. El punto óptimo es aquel que produce la máxima señal observada en el osciloscopio.

Nota importante. Usted ha visto que es posible observar simultáneamente en el osciloscopio la señal del transmisor y la señal del receptor. Supongamos que el barrido del osciloscopio está sincronizado con el transmisor. Cuando la frecuencia de ambas señales es idéntica se observa que las ondas no se mueven relativamente. En cambio si las frecuencias difieren ligeramente existirá un movimiento relativo entre ellas. Supongamos que el transmisor tiene $f = 40\,000$ Hz y el receptor $t = 40001$ Hz se observará que la señal del receptor se mueve en relación a la del transmisor a una tasa de una (1) onda por segundo. Es decir observando la tasa de velocidad relativa de las ondas en el osciloscopio, es posible determinar cambios muy pequeños de frecuencia (en el caso anterior es un cambio de $1/40.000!$). Al cambiar la frecuencia cambia el período de la onda; sin embargo no es posible observar en la cara del osciloscopio un cambio del período tan pequeño (Por ejemplo: Si el barrido es $2\ \mu\text{s}/\text{cm}$, el período la onda que se observa en el osciloscopio, tiene 7 cm. Luego un incremento de $1/40000$ en la frecuencia produce una disminución en el período observado de $7/40000$ cm, o sea $0,175 \times 10^{-3}$ mm)

Si se hace un **traslado** del transmisor (o el receptor) **una distancia** igual a una longitud de onda, se observará en el osciloscopio un movimiento relativo entre la señal del transmisor y el receptor de un período exactamente.

En cambio si se mueve a velocidad constante el transmisor o el receptor, se observará en el osciloscopio un movimiento relativo constante entre las dos señales. Este movimiento relativo constante es debido al cambio de frecuencia por efecto Doppler.

Parte B.-Efecto Doppler:

Movimiento del transmisor o el receptor

¹ Los instrumentos utilizados para esta experiencia han sido contruidos por estudiantes y han sido modificados con respecto a los prototipos originales. Por ello puede haber ligeras variantes en los equipos con respecto a lo descrito en esta guía.

Universidad Simón Bolívar

FS2282, Laboratorio de Física 3

- Coloque el transmisor o receptor en el aparato EPSON haciendo las conexiones indicadas en el diagrama que describe el aparato.
- Dispare (Trigger) el osciloscopio con la señal recibida en el canal 1 de forma que el barrido del osciloscopio esté sincronizado con la señal del transmisor.
- Ajuste el barrido hasta observar en la pantalla del osciloscopio de 2 a 6 ondas completas de las señales provenientes del transmisor y del receptor. Determine la frecuencia de las ondas.
- Acerque lentamente el receptor hacia el transmisor mientras observa la pantalla. Que observa?. Explique. Aleje lentamente el receptor del transmisor. Que observa? Explique.
- Traslade el transmisor (o Receptor) un número entero de longitudes de onda. Mida el traslado realizado y determine la longitud de onda. Usando este valor y la frecuencia determine la velocidad del sonido. Coincide con el valor que Ud. esperaría?
- Haciendo uso del programa DOPPLER de control en la PC, ponga en movimiento el transmisor a distintas velocidades. En cada caso, determine la velocidad de traslación del transmisor (o Receptor) mediante el efecto Doppler observado en el osciloscopio y directamente midiendo el tiempo requerido para un desplazamiento dado. Invierta las posiciones del transmisor y receptor y repita la experiencia. Coinciden los resultados? Cuáles son los límites de error? Haga una tabla con todas sus medidas y con los resultados.

Movimiento del aire

- Coloque entre el transmisor y el receptor el tubo de cartón acoplado al ventilador. El extremo por donde entra el aire debe acoplarse directamente al transmisor. El extremo opuesto debe quedar a unos 5 cm del receptor.
- Ajuste el osciloscopio de manera que el barrido esté sincronizado con la señal del transmisor.
- Encienda el ventilador. Que observa? Haga varias medidas del corrimiento de la onda cuando se enciende y se apaga el ventilador.

Obtenga el promedio de sus medidas de corrimiento $\overline{\Delta t}$. A qué se debe este corrimiento?

- Mida la distancia entre el transmisor y el receptor.
- Calcule la velocidad del aire en el tubo. Calcule el límite de error. Son razonables los resultados?
- La medida de la velocidad del aire fue hecha con ondas ultrasónicas. Debido a la semejanza entre fenómenos ondulatorios. No podría hacerse una experiencia semejante con microondas? Hay algún inconveniente fundamental?
- En la experiencia se midió de una forma sencilla la velocidad del sonido. No podría medirse la velocidad de la luz de la misma manera usando microondas? Haga cálculos numéricos para formular su respuesta.

Parte C.- Radar ultrasónico (sonar)

La figura 5 indica el montaje para la experiencia de radar ultrasónico. Para obtener resultados satisfactorios es necesario ser cuidadoso con los ajustes indicados a continuación:

- Coloque el interruptor **PUL/CONT** que tiene el transmisor en (**PUL**) pulso.
- Ajuste la ganancia del receptor hasta observar la señal como en la figura 6. Las Señales de ambas unidades deberían ser aproximadamente de igual duración.

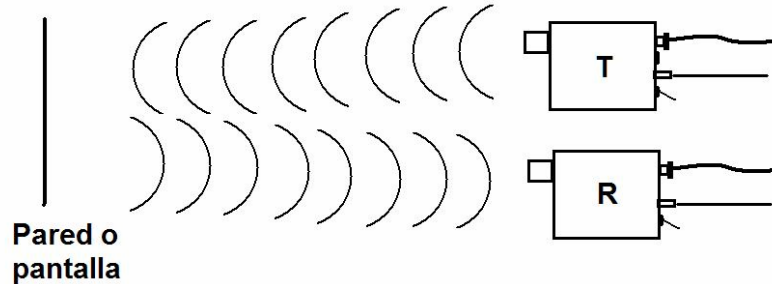


FIGURA 5. Montaje para la experiencia de radar ultrasónico.

c) Mida la distancia transmisor-blanco-receptor. En el osciloscopio: mida el retardo de la señal del receptor con respecto al transmisor y conociendo la velocidad del sonido deduzca la distancia del blanco. Coinciden sus resultados?

d) Repita la experiencia anterior con el blanco a distintas distancias. Para blancos lejanos es conveniente colocar la bocina en el receptor. Reporte los resultados de sus experiencias en tablas apropiadas.

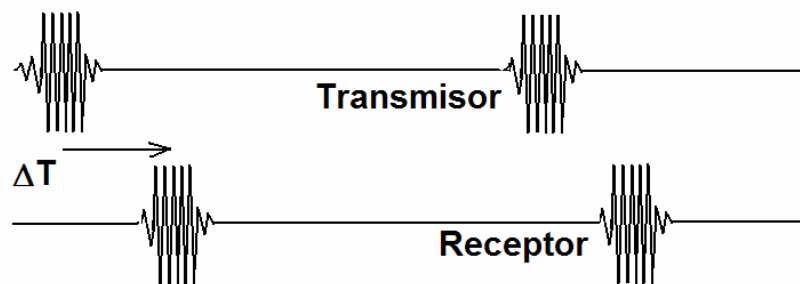


FIGURA 6.- Señales en la pantalla del osciloscopio

Parte D.- Ondas Estacionaria.

a) Realizar el montaje indicado en la figura 7. El transmisor y reflector deben colocarse con una separación de aproximadamente 1 metro. El receptor con una bocina convergente se coloca sobre un jinete en un banco óptico.

b) La distancia transmisor-reflector **debe ser un múltiplo de $\lambda/2$** para obtener ondas estacionarias. Esto se logra, empíricamente, moviendo el transmisor unos milímetros hacia adelante o atrás hasta la posición que produzca máxima señal en el receptor (Durante este ajuste modifique la ganancia del receptor de forma que la señal no sea cero ni tampoco esté saturada). **Nota:** Este ajuste es importante para poder observar las ondas estacionarias.

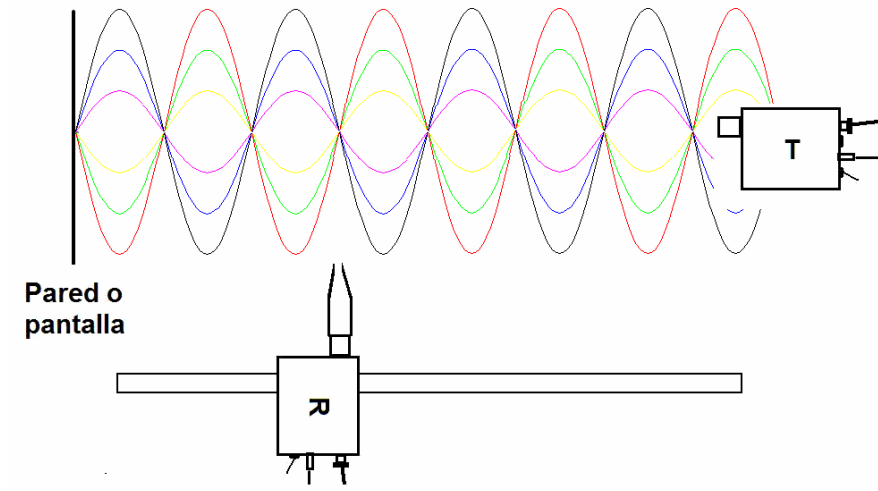


Figura 7. Montaje para medir las ondas estacionarias.

- c) Coloque una cinta de papel de 1 cm. de ancho y 25 cm. de largo en el banco óptico, debajo del jinete que soporta el receptor, a lo largo del banco óptico observando las variaciones de la señal. Máximos corresponden a vientres mínimos a nodos.
- d) Marque con un lápiz, sobre la cinta de papel, las posiciones sucesivas de 20 nodos (ó 20 vientres) de la onda estacionaria, y de estas posiciones determine la longitud de la onda estacionaria ultrasónica. (También es posible anotar las posiciones de los mínimos mediante la escala del banco óptico).
- e) Observe la señal del receptor en el osciloscopio. Mida el período de las ondas y deduzca la frecuencia de ésta.
- f) A partir de las medidas anteriores deduzca la velocidad del sonido en el aire. Coincide este resultado, dentro de los errores, con los resultados anteriores?
- g) Escriba la ecuación de la onda estacionaria (deje indicado mediante un símbolo la amplitud y_m)

Instrumental para Efecto Doppler.²

Resumen.

En esta parte se describe el aparato y el procedimiento de operación del instrumental para la experiencia de **Ondas Estacionarias y Efecto Doppler en ultrasonido**

Descripción.

El diagrama de bloques del instrumento indica las partes y la interconexión

Conecte o verifique que las conexiones del equipo están de acuerdo al diagrama de bloques.

Reconozca e identifique el transmisor y receptor de ultra sonido, los cables del suministro de potencia y los cables coaxiales que llevan la señal desde el transmisor o reflector hasta el “punto de conexión”. En este punto de conexión hay dos terminales BNC y un terminal de conexión serial. Este punto permite la conexión del aparato con un osciloscopio y con una computadora personal PC.

² El aparato fue construido por el Br. Andrés Sajo Castelli. Parte de la electrónica y el programa de control en LabView es debida al Br. Jesús Bastardo. Ambos bajo la supervisión de los Profesores: Haydn Barros y Eduardo Greaves.

Universidad Simón Bolívar
FS2282, Laboratorio de Física 3

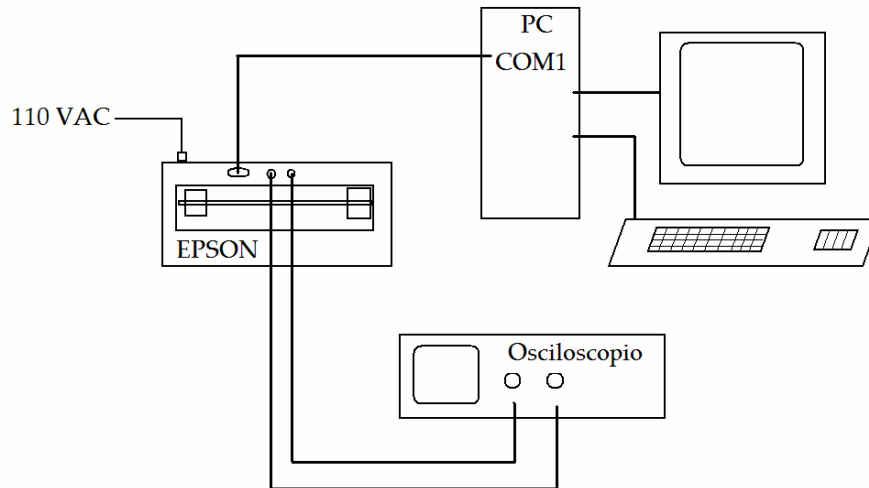
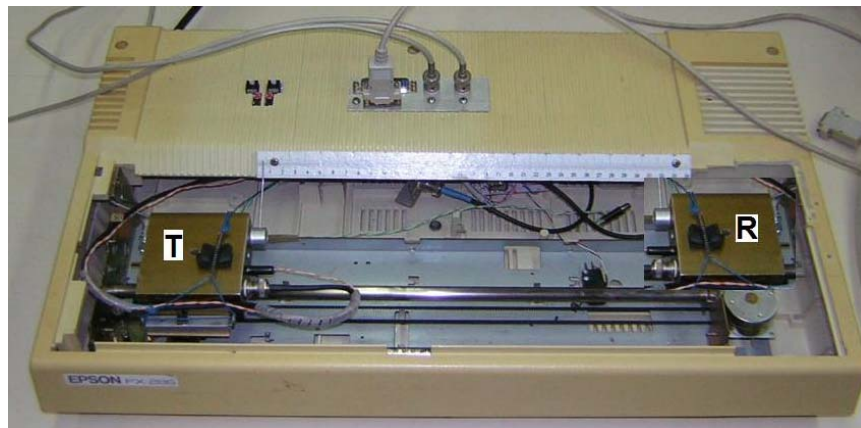


Diagrama de bloques del equipo para efecto Doppler.

La fotografía siguiente muestra el aparato: Una impresora EPSON modificada.



OJO: Verifique que los conectores de potencia del transmisor y receptor estén bien enchufados!

Identifique el carro que se mueve a lo largo de la barra de guía, el apuntador y la escala lineal. El carro se lo puede deslizar con la mano a lo largo de la barra de guía.

Ambos el transmisor y el receptor se pueden levantar de su sitio. Esto es necesario para algunas de las experiencias. Al levantarlos quedan unidos al aparato mediante los cables de suministro y los cables coaxiales de señal. También es posible intercambiar de posición el transmisor y el receptor. Para esto desconecte cuidadosamente los cables.

Afloje o levante el sistema de fijación del carro móvil y retire las unidades.

Por favor. Al terminar su experiencia deje la unidad de transmisor y receptor debidamente conectada con los cables en el aparato EPSON.

Observe que el transmisor y el receptor tienen unos controles: En ambos hay un control ON-OFF. En el transmisor hay controles adicionales: El interruptor PULSO-CONT el cual controla el modo de operación. En CONT el transmisor produce un tren continuo de ultra sonido. En PULSO el generador produce pulsos cortos de ultrasonido. Los interruptores ON-OFF deben colocarse ambos en ON.

Operación del aparato

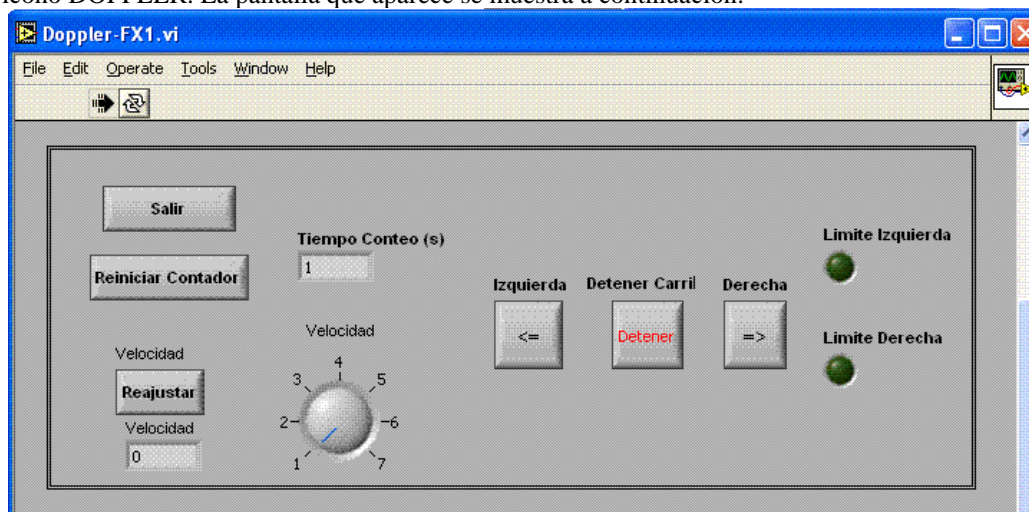
Encienda la impresora EPSON. Al encender la impresora se encienden la fuente de suministro para el movimiento del carro así como del transmisor de ultrasonido y del receptor de ultrasonido. Al encender la impresora EPSON usualmente el carro se mueve hasta un extremo. Proceda a encender el osciloscopio y verificar la conexión de los cables coaxiales desde el instrumento EPSON hasta el osciloscopio.

Universidad Simón Bolívar FS2282, Laboratorio de Física 3

Observe las señales de ultrasonido en el osciloscopio. Ajuste los controles del osciloscopio adecuadamente para ver la señal del transmisor y del receptor como un tren de ondas continuo con varias oscilaciones en pantalla.

Encienda la PC y seleccione como usuario "ESTUDIANTE 1"

Active el icono DOPPLER. La pantalla que aparece se muestra a continuación:



El control de velocidad del carro se opera con el ratón. Hay 7 velocidades programadas las cuales disminuyen ligeramente con el valor del número: La velocidad es mayor para números menores y viceversa.

Para activar el movimiento:

- 1.- Seleccione una velocidad.
- 2.- Pise REAJUSTAR.
- 3.- El carro se mueve a la IZQUIERDA o a la DERECHA pisando los botones respectivos. Al final del trayecto hay unos micro interruptores que detienen el movimiento. También se puede detener el movimiento pisando el botón DETENER.
- 4.- Para cambiar la velocidad hay que: A.- Detener el movimiento. B.-Cambiar la velocidad. C.- pisar REAJUSTAR, D.- Iniciar el movimiento de nuevo.

El "TIEMPO DE CONTEO" es un cronómetro: En él aparece el tiempo (en segundos) que el carro ha estado en movimiento.

Agradecimientos

El diseño conceptual y realización de esta experiencia es debida al Prof. Eduardo Greaves. La USB le agradece encarecidamente a la empresa **Hewlett Packard de Venezuela**, por la donación de equipos de computación y fondos para desarrollos del proyecto, (Año 2007) con los cuales se financió la implementación de esta experiencia.

Referencias:

- 1.- M. Alonso y E. J. Finn. Física Vol. II Campos y Ondas. Fondo Educativo Interamericano S.A. México, 1976. Efecto Doppler: Sección 18.13
- 2.- Sears y Zemansky. Física. Aguilar Madrid 1971. Fenómenos acústicos: Cap. 23 Efecto Doppler. Sección 23 - 9.
- 3.- F. W. Sears, M. K. Zemansky, H. D. Young y R. A. Freedman. Física Universitaria. Pearson Education Mexico 2005. Volumen 1, Sec. 16.8, pp 621 a 627. Discute el efecto Doppler en sonido; Volumen 2, Sec. 37.6, p. 1423. Discute el efecto Doppler en la Luz
- 4.- Resnick y Halliday. "Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería: Sección 20-7. John Wiley Sons Inc. New York 1961. Ondas de Sonido: Cap. 20. Efecto Doppler: Sec. 20-7
- 5.- Resnick y Halliday. Parte 2 en español (el verde) Compañía editorial Continental SA Mexico 1985. Sección 42-5, p.390. Discute fundamentalmente el efecto Doppler en la luz.

Tabla comparativa de características de ondas de ultrasonido, microonda, luz visible y ondas acústicas.

TIPO DE ONDA	CLASIFICACIÓN DE LA ONDA POR SU NATURALEZA FÍSICA	CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN	PRESENTA EL FENÓMENO DE POLARIZACIÓN	RANGO DE LONGITUD DE ONDA (METROS)	RANGO DE FRECUENCIA DE LA ONDA (HZ)	VELOCIDAD DE LA ONDA M/SEG.	NECESITA MEDIO PARA PROPAGARSE
Ultrasonido	Mecánica	Longitudinal	no	5×10^{-7} - 1.6×10^{-1}	2×10^4 - 6×10^8	(en al aire para $f= 40$ KHz) 320	si
Microonda	Electromagnética	Transversales	si	1×10^{-3} - 1×10^{-1}	1×10^9 - 1×10^{12}	3×10^{-8}	no (vacio)
Luz visible	Electromagnética	Transversales	si	4×10^{-7} - 6.9×10^{-7}	10^{14} - 10^{15}	3×10^{-8}	no (vacio)
Acústica	Mecánicas	Longitudinales	no	1.6×10^{-2} - 1.6×10^{-2}	2×10^1 - 2×10^4	326	si