

- Correcciones Generales:
- 1) La gran mayoría de las figuras están desordenadas.
 - 2) En general, mala redacción. Hay aprtes que parecen oraciones sueltas.
 - 3) Cuidado con cifras significativas
 - 4) Hay que explicar las figuras.

FRANCO :)

Caracterización del comportamiento de las ondas de ultrasonido generadas por piezoeléctricos

Andrew McCallum
awmcc97@gmail.com

Joaquín Sequeira
joaquinetsequeira@gmail.com

Tadeo Rodríguez
tadeorodriguez842@gmail.com

19 de Abril, 2023

El objetivo de este trabajo fue describir el comportamiento y la estructura de ondas de ultrasonido. En particular, se buscó encontrar el tipo de onda emitida, el decaimiento de su amplitud con la distancia y el ángulo, la longitud de onda, la frecuencia de resonancia y la velocidad del sonido. También se buscó obtener fenómenos de interferencia entre dos ondas. Para todos estos experimentos se usaron transductores piezoeléctricos, un osciloscopio y un generador de funciones.

1. Introducción

En este trabajo, ~~a través de diversas experiencias y mediciones~~, se buscó caracterizar el comportamiento de una onda de ultrasonido, y luego observar ^{el fenómeno de} interferencia. Las ondas de presión que se estudiaron se comportan de acuerdo a la ecuación de ondas clásica ~~1 [1], que establece~~

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 \psi, \tag{1}$$

Cuidado, psi es la función de onda y la solución a la ecuación 1 es ...
donde ψ , su solución para ondas que se propagan, es de la forma:

$$\psi(r, t) = A(r)e^{i(kr + \omega t)}. \tag{2}$$

Aquí su fase $\phi = kr + \omega t$ es una función de r y de t , con κ un vector de frecuencias espaciales, y ω una frecuencia temporal. La amplitud A es también función de r , y su forma dicta el decaimiento de la amplitud a medida que la onda se propaga.

La clasificación de una onda en plana, cilíndrica, o esférica, depende de ese decaimiento. Se dice onda plana en el caso que $A(r)=A$, es decir, que la amplitud de la onda se mantenga constante; onda cilíndrica, si cae como la raíz cuadrada de r ($A(r) = Ar^{-1/2}$); o onda esférica, que cae como r al cuadrado ($A(r) = Ar^{-2}$).

La fase ϕ por su lado, ~~también da información valiosa, por ejemplo:~~ Si se fija el tiempo, la fase quedaría

$$\phi(r) = \kappa r + \varphi_0. \tag{3}$$

Además, para encontrar la velocidad de propagación de una onda, se puede fijar una fase ϕ_0 y despejar la posición r , de donde se obtiene

$$r = \frac{\phi_0}{\kappa} \pm \frac{\omega}{\kappa} t, \tag{4}$$

se ve que la velocidad de propagación es

$$v = \frac{\omega}{\kappa}. \tag{5}$$

Las posiciones que, a un determinado tiempo, tengan la misma fase, se las denomina frente de ondas. Este frente de ondas va a evolucionar ^{para los puntos en el espacio} a los r que cumplen ^{la ecuación 4} (4), y el frente de ondas se va a desplazar en el espacio con velocidad v . La forma geométrica del frente de ondas ~~es un dato de relevancia y~~ puede ser plana, esférica o cilíndrica.

Para el estudio de interferencia se partió de la solución a la ecuación de ondas y principio de superposición, que establece que si hay dos ondas de fuentes puntuales, la onda resultante es la suma de dos ondas

$$\psi_1(r, t) + \psi_2(r, t) = A_1(r)e^{i(kr + \omega t)} + A_2(r)e^{i(kr + \omega t + \varphi)}, \tag{6}$$

se llega a que la onda resultante tiene una amplitud

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(kr_1 + kr_2 + \varphi)}, \tag{7}$$

Esto son frases aisladas sin conexión y mal redactadas. Lean de nuevo todo esto y piensen si tiene sentido.

En general, usen el subíndice 'o' para denotar una constante. Es decir: $A(r) = A_o$

¿Qué es ϕ_0 ?

Conecten las frases. 'Si se superponen dos funciones de onda se produce el fenómeno de interferencia ...'

que oscila dependiendo de lo desfasadas que estén en determinado punto del espacio las dos ondas que interfieren.

Los transductores usados para generar las ondas están formados por materiales piezoeléctricos. Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de que un cambio en el campo electromagnético genera una deformación en el material. Si a un piezoeléctrico se le induce un potencial oscilante, el volumen del material también oscilará. También funciona a la inversa, ante deformaciones por fuerzas internas desarrolla un potencial. De esta forma, dos transductores piezoeléctricos pueden recibir y enviar información de la misma forma. La fuerza de presión que actúa sobre los transductores funciona como un movimiento forzado, donde a grandes tiempos la amplitud es

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\Omega\omega)^2}}, \quad (8)$$

donde ω_0 es la frecuencia propia del sistema. Esta función es conocida como una campana Lorentzeana.

2. ~~Caracterización~~ Medición de la onda emitida

En esta sección se analizarán las características de la onda emitida por un piezoeléctrico: La frecuencia de resonancia, la longitud de onda (λ), la amplitud y su decaimiento y la velocidad del sonido.

2.1. Desarrollo experimental

Con el objetivo de medir la longitud de onda (λ), la dependencia de la amplitud (V_{pp}) de la distancia, la frecuencia de resonancia de los piezoeléctricos y el ángulo con respecto al riel se realizaron 4 experimentos distintos.

El sistema experimental consistió en usar dos piezoeléctricos, apuntados entre sí, sobre un riel. El primero (emisor) se encontraba conectado a un generador de funciones que le mandaba una señal sinusoidal, haciendo que emitiera ondas de ultrasonido. El otro (receptor), respondía a estas ondas con su propio voltaje el cual fue captado mediante el osciloscopio (Figura 1).

Luego, con el objetivo de encontrar la velocidad del sonido, se realizó otro experimento con el mismo sistema experimental.

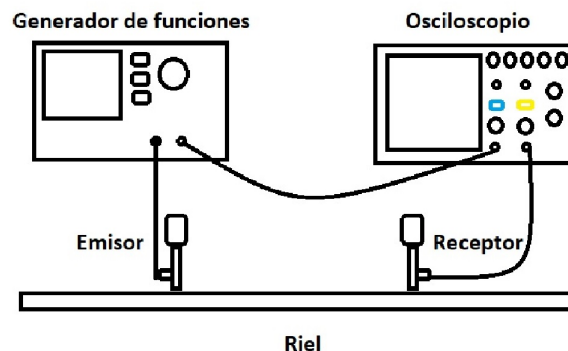


Figura 1: Esquema general de los experimentos. Se observan los piezoeléctricos en la parte inferior de la imagen, montados sobre un riel. El emisor conectado al Generador de funciones y el receptor conectado al osciloscopio. A su vez el Generador de funciones está conectado al osciloscopio.

2.1.1. Frecuencia de resonancia

IMPORTANTE: Fíjense que no son necesarias estas sub-sub-secciones. Después de la sub-sección de desarrollo experimental, todo podría ser simplemente un texto y hubiera quedado igual de bien, sin tantas interrupciones al leer.

En el primer experimento se buscó medir la frecuencia natural de los piezoeléctricos. Consistió en dejar el emisor y el receptor a una distancia fija y hacer un barrido de frecuencias ~~del generador de funciones~~.

2.1.2. Longitud de Onda

En el segundo experimento, se buscó medir la longitud de onda λ . Consistió en aumentar la distancia entre el emisor y el receptor sobre el riel hasta ver que ~~las dos señales que captaba el osciloscopio~~ ^{la señal emitida y la recibida} estuvieran en fase. ~~Una de las señales provenía directamente del generador de funciones y la otra llegaba desde el receptor.~~ Al llegar a esto se marcó el lugar (a) y se volvió a alejar el receptor hasta volver a estar en fase (b).

¿Qué es (a) y (b)? Si son distancias deberían estar marcadas en alguna figura

2.1.3. Amplitud en función de la distancia

En el tercer experimento se buscó medir la amplitud (V_{pp}) en función de la distancia. También partiendo desde un punto en el cual el emisor y receptor estaban muy cercanos en el riel y tomando mediciones del osciloscopio a medida que se lo iba alejando.

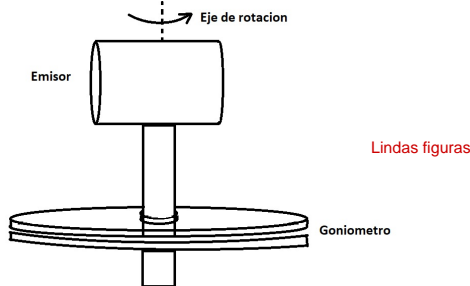
Las cosas tienen que estar cuantificadas

También se puede decir 'determinar la dependencia angular de la amplitud'

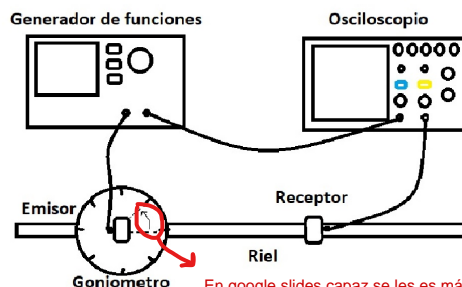
2.1.4. Amplitud en función del ángulo

En el cuarto experimento se buscó determinar la dependencia de la amplitud del ángulo del emisor con respecto al riel. Se puso un goniómetro en perpendicular al eje del emisor para poder rotarlo en el eje x e y (Figura 2), y se midió el efecto en la pantalla del osciloscopio (Figura 3). Se lo rotó 2π .

la amplitud para diferentes ángulos ¿Qué paso tomaron?



Lindas figuras



'en función'

En google slides capaz se les es más fácil hacer algunas cosas, como flechas. Consejo: Podrían poner un ángulo (alfa, por ejemplo) y hablar de alfa y se les sería más fácil la explicación.

Figura 2: Esquema del goniómetro visto desde el costado. Se aprecia mejor la fijación del disco graduado (parte inferior del goniómetro) al sostén del piezoeléctrico y el nonio/lamina (parte superior del goniómetro) al piezoeléctrico en si.

Figura 3: Esquema del goniómetro visto desde arriba. Se observa el goniómetro colocado entre el piezoeléctrico y el riel. El disco graduado fijo a el sostén del piezoeléctrico, y el nonio/lamina fijo al piezoeléctrico.

2.1.5. Velocidad del sonido

En el quinto experimento, con el objetivo de encontrar la velocidad del sonido se acercaron los piezoeléctricos hasta que se estaban tocando. También se cambió la señal emitida por el generador de funciones a una onda cuadrada y se bajó la frecuencia emitida por este a 100 Hz. Luego, se tomaron datos alejando el receptor y calculando el Δt entre la señal recibida por el generador de funciones directo al osciloscopio y la señal recibida por el receptor.

Acá hubiera quedado bien un gráfico de las señales enviada y recibida marcando qué es Δt .

Dos correcciones:

- 1) No es necesario ni eficiente que digan todo el tiempo que usaron osciloscopio/generador. Solo son instrumentos. No dirían: 'se vieron las mediciones con los ojos'.
- 2) Acompañado de la anterior. En esta parte simplemente digan que se envió una señal cuadrada de tal frecuencia.

¿A qué paso?

2.2. Resultados

O sea, un poco con lo que les dije antes. Numerar los experimentos no siempre sirve porque uno no se acuerda qué es qué. Mismo ustedes vuelven a mencionar de qué trata. Entonces el número pierde utilidad y solo entorpece.

En el primer experimento, con el objetivo de encontrar la frecuencia de natural del piezoeléctrico, se hizo un barrido de frecuencias del generador de funciones con el emisor y el receptor a una distancia fija. Se hizo un barrido grueso arrancando desde 10 Hz cada 1 kHz hasta encontrar una respuesta en el osciloscopio. A los 39 kHz se recibió señal y se hizo un barrido fino cada 200 Hz hasta que volvió al valor previo a la señal. Los datos de amplitud en función de la frecuencia se ajustaron de acuerdo a lo que se esperaba teóricamente, una función lorentziana de la forma (8) (Figura 4). El ajuste no fue del todo adecuado, viéndose su bondad en un $\chi^2 = 1035,01$, mostrando que los errores fueron subestimados.

¿Entre cuales voltajes?

Describan la figura. '...' (ecuación 8). En la figura 4 se observan los datos medidos y el ajuste lorentziano. En ajuste ...

El resultado de este experimento dio que la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico es:

El ajuste

$$\omega = (40.532 \pm 0.001) \text{ kHz.} \quad (9)$$

No es necesario que sea una ecuación aislada

FIGURA 4

Para el segundo experimento, con el objetivo de calcular λ , se alejó el receptor del emisor hasta encontrar que ambas señales estaban en fase. De acuerdo con (4), y sabiendo que $\lambda = \frac{2\pi}{k}$, se pudo establecer que cada x donde ambas señales estuvieran en fase, se correspondía con un múltiplo de la longitud de onda. Partiendo entonces de la relación

Yo sé que se entiende, pero nunca definieron un eje de coordenadas. No se sabe qué es 'x'. O tiene que estar definido en la figura o

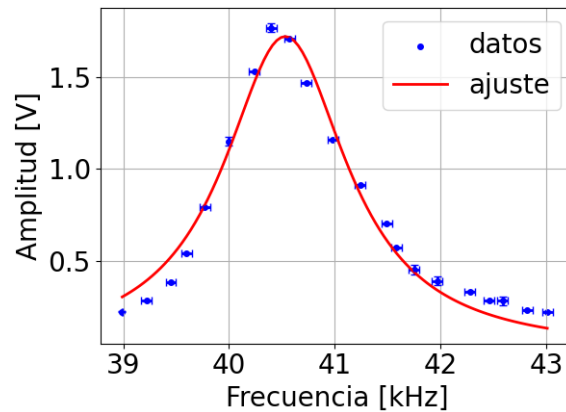
Ya lo definieron antes. No es necesario volver a definirlo.

$$\lambda n = d, \quad (10)$$

donde d es la distancia entre los piezoeléctricos, n la cantidad de mediciones y λ la longitud de onda. Se pudo hacer un gráfico de los datos y ajustar linealmente para encontrar el valor más representativo de λ . En la Figura 5 se puede observar los distintos valores de n obtenidos en función de la distancia, que fueron ajustados linealmente con un $R^2 = 0,9999$, mostrando la correlación lineal entre las variables. Despejando la pendiente (λ), o mejor dicho

$$1/\lambda, \quad (11)$$

Igual que antes, no tiene que ser una ecuación aislada

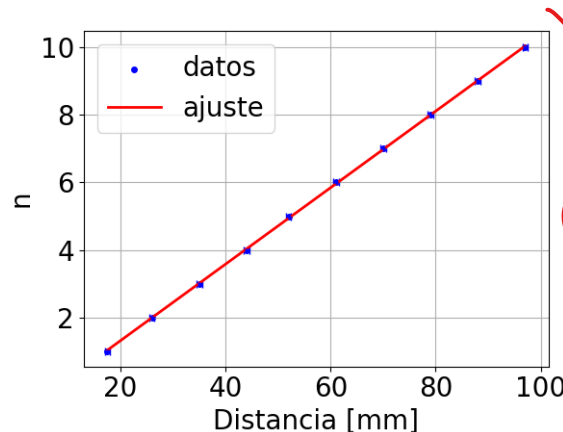


Les marco en verde dónde debería estar

Figura 4: Barrido de frecuencias del generador de funciones a través del emisor. Se puede observar un máximo en $(40,532 \pm 0,001)$ kHz, que fue el valor tomado como frecuencia natural del piezoeléctrico.

el valor más representativo fue:

$$\lambda = (8,828 \pm 0,004) \text{ mm.} \quad (12)$$



Chicos. El error lo tienen que tener en el eje y. SIMPRE. Entonces. Tienen que graficar Distancia en función de n, porque el error está en la distancia.

Figura 5: n medido en función de la distancia

Para el tercer experimento se buscó medir como decaía la amplitud en función de la distancia.

Alejando el receptor del emisor encontramos que la amplitud no sólo disminuía, si no que también oscilaba (Figura 6). Con esto en vista se decidió tomar la amplitud en los máximos ya que el decaimiento de la amplitud es el mismo factor tanto para máximos como mínimos (Figura 7).

La amplitud se puede describir como,

$$A(r) = B/r^n \quad (13)$$

donde r es la distancia y n es el factor que corresponde al decaimiento de la amplitud. Linealizando la ecuación se llega a

$$\ln(Amp) = \ln(B) - n \ln(r) \quad (14)$$

donde n es la pendiente. Entonces se ajustó la (14) por una recta (Figura 8), resultando en una correlación lineal dada por $R^2 = 0,989$. Entonces se encontró el factor de decaimiento

$$n = (1,195\,767 \pm 0,000\,001). \quad (15)$$

Esto demuestra que es una onda esférica ya que estas decaen a razón de $1/r$.

Para el cuarto experimento se buscó encontrar la amplitud en función del ángulo. Se romo el piezoeléctrico emisor y cada $\pi/6$ se tomaron datos. Debido a la interferencia causada por la pared, los datos entre los $\pi/2$

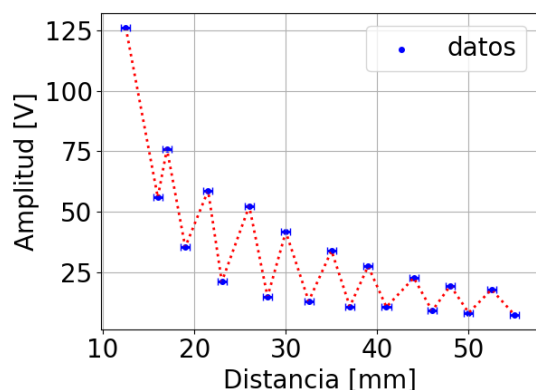


Figura 6: Amplitud en función de la distancia. Se observa la oscilación con tendencia negativa de la amplitud (Vpp) cuando incrementa la distancia entre los piezoeléctricos.

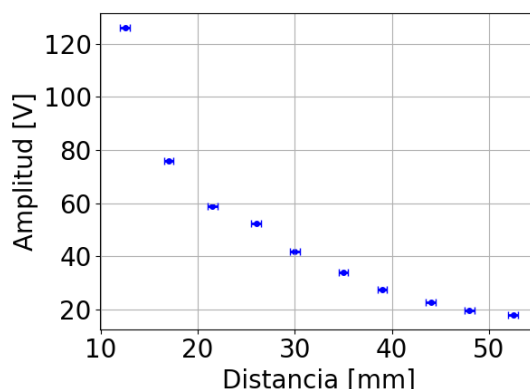


Figura 7: Amplitud en función de la distancia (Sólo los máximos)

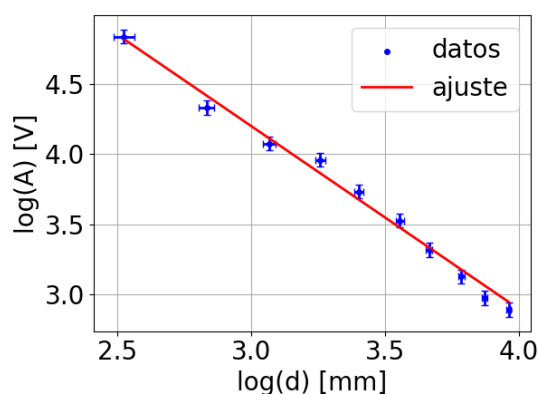


Figura 8: Ajuste lineal sobre los máximos de la amplitud en función de la distancia.

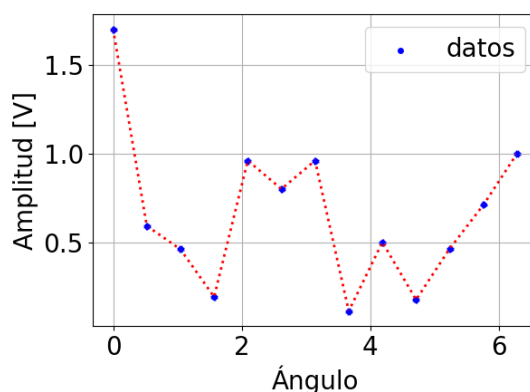


Figura 9: Amplitud en función del ángulo. Se observa en los datos $3\pi/4$, $5\pi/6$, π y $4\pi/3$ un crecimiento de la amplitud que se cree se debió a la interferencia de la señal con los alrededores del experimento.

hasta los $7\pi/6$, y una vez más a los $4\pi/3$, no corresponden al verdadero decaimiento de la amplitud en función del ángulo (Figura 9). → FIG 9

En el quinto experimento se buscó calcular la velocidad del sonido. Para esto, se envió un pulso cuadrado desde el osciloscopio al primer piezoeléctrico, y se midió, para varias distancias entre los dos transductores, el Δt que había entre la llegada del pulso directamente desde el generador de funciones al osciloscopio y el recibido por el receptor. Usando que a partir de (4) y la pendiente entre x y t es la velocidad de propagación, se realizó un ajuste lineal (Figura 10). La adecuación del ajuste se determinó a partir del valor de χ^2 , que resultó $\chi^2 = 51,810$. El mismo muestra que el ajuste no fue muy preciso, lo cual puede atribuirse a una estimación incorrecta de los errores. De todas formas, un $R^2 = 0,998$ muestra la marcada colinealidad entre las magnitudes. La pendiente calculada resultó:

$$v = (343,8 \pm 0,2) \text{ m/s} \quad (16)$$

FIG 10

Una figura NUNCA puede estar en otra sección. Entiendo que a veces se reorganicen un poco por espacio, pero no en otra sección.

3. Interferencia

En esta sección se analizara el fenómeno de interferencia entre dos emisores sobre un receptor. } → Muy pobre ...

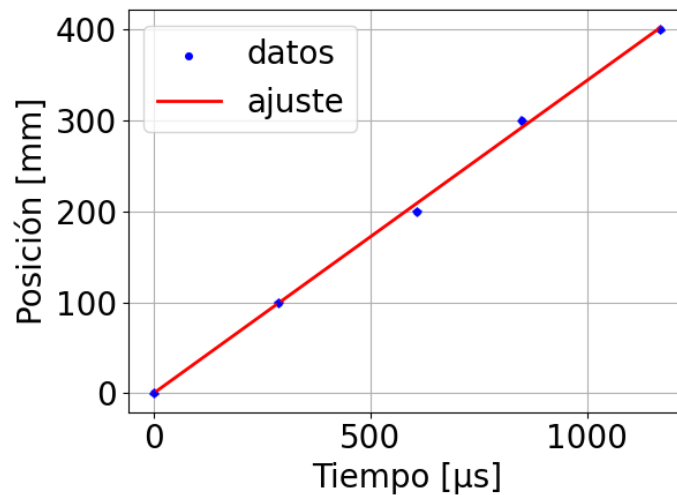


Figura 10: Gráfico de el tiempo que tardaba la señal en llegar al piezoeléctrico a través del aire en función a la distancia a la que se encontraba el receptor del emisor.

3.1. Desarrollo experimental

Con el objetivo de observar el fenómeno de interferencia se diseñó un sistema experimental como el de la Figura 11. Se realizaron dos experimentos. El primero buscó encontrar ~~dónde, sobre el riel, se encontraban los máximos de las campanas de los piezoeléctricos emisores 1 y 2 y sus respectivas fases.~~ En el segundo experimento se observó el fenómeno de interferencia que producían los emisores sobre el receptor.

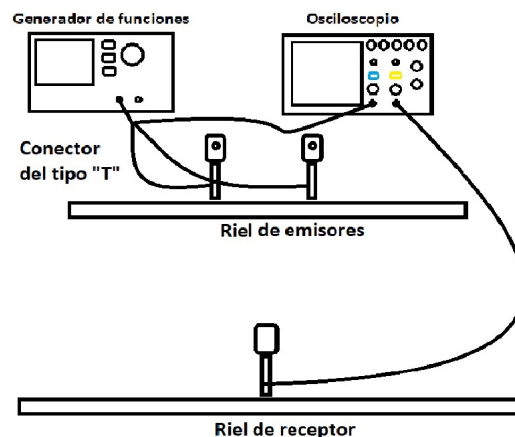


Figura 11: Esquema del sistema experimental para los experimentos de interferencia. Se puede observar dos emisores a una distancia fija sobre el riel de emisores y un receptor móvil en el riel de receptor. Ambos emisores conectados a un conector del tipo ("T") y a su vez conectados a otro conector de tipo ("T") que estaba conectado al generador de funciones. El receptor está conectado al osciloscopio.

3.1.1. Máximos y fases de los emisores

En el primer experimento se conectó cada emisor por separado al generador de funciones ~~(figura ? esquema interferencia)~~ para medir la amplitud de sus ondas generadas en distintos puntos de la misma recta, moviendo el receptor sobre el riel, tomando mediciones ~~del osciloscopio~~ para tanto la amplitud como la fase de la onda recibida.

3.1.2. Interferencia

En el segundo experimento se buscó analizar la interferencia generada por los emisores, manteniendo el mismo procedimiento que en el experimento anterior, pero con ambos emisores conectados al generador de funciones ~~(figura esquema interferencia)~~. Se giró uno de los emisores para ~~que se solaparan espacialmente las campanas, ya que inicialmente estaban separadas, y no se producía interferencia.~~

3.2. Resultados

En el primer experimento se tomaron mediciones moviendo el receptor a lo largo de los respectivos rangos del riel en los que se podía apreciar una campana.

Para el primer emisor, se puede ver la campana (Figura 12), y en la fase (Figuras 14 y 15) se observa que la misma no aparece a lo largo de un período completo. Esto se refuerza al analizar la amplitud en función de la fase (Figura 13), donde podemos ver media oscilación.

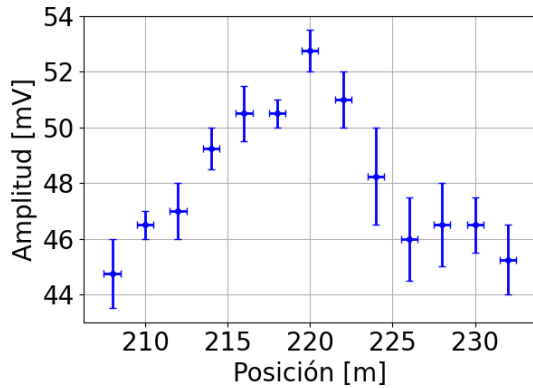


Figura 12: Gráfico de la amplitud de la onda del primer emisor en función de la posición del receptor en el riel

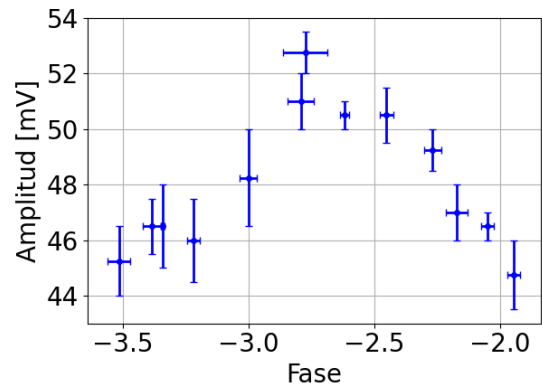


Figura 13: Gráfico de la amplitud de la onda del primer emisor en función de su fase

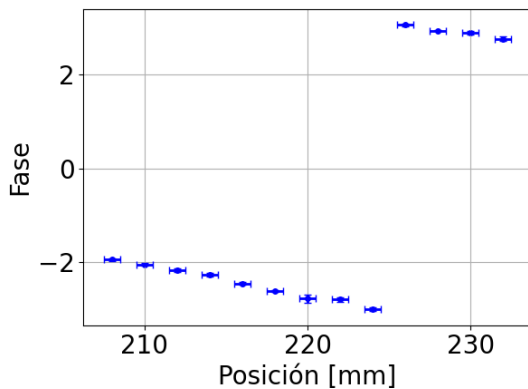


Figura 14: Gráfico de la fase de la onda del primer emisor en función de la posición del receptor en el riel

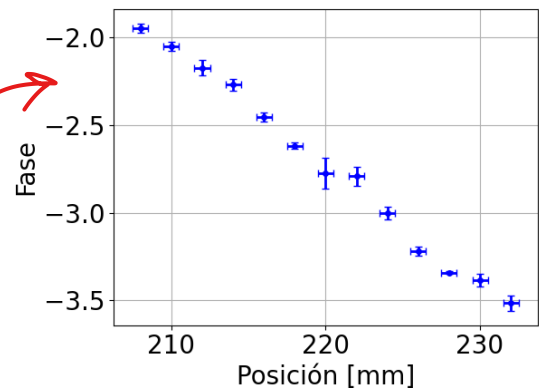


Figura 15: Gráfico de la fase de la onda del primer emisor en función de la posición del receptor en el riel, en un intervalo continuo

Las diferencias que aparecen en el segundo emisor se encuentran primero en el ancho de la campana (Figura 16), y segundo y principalmente, en que la misma se desarrolla en un período completo. La fase (Figura 18) arranca y termina en puntos circundantes, y en la onda (Figura 17) se ve una oscilación completa (además de apreciarse el decaimiento causado por la mayor distancia al emisor).

Por último, con el segundo experimento se puede ver el patrón de interferencia, tanto en función de la posición del receptor (Figura 19) como de la fase (Figura 20). Estos gráficos no tienen el mismo orden, haciendo que se observe un corrimiento. La fase (Figura 21) no mostró una correlación clara con la posición, al menos para la cantidad de mediciones realizadas.

4. Conclusión

En conclusión, para el primer experimento, haciendo el barrido de frecuencias del generador de funciones con los piezoeléctricos a una distancia fija se encontró que la frecuencia natural de ellos es,

$$\omega = (40,532 \pm 0,001) \text{ kHz} \quad (17)$$

Para el segundo experimento se buscaba encontrar λ . Manteniendo una frecuencia y amplitud fija y cambiando la distancia entre los piezoeléctricos, tal que las señales en el generador de funciones estuvieran en fase,

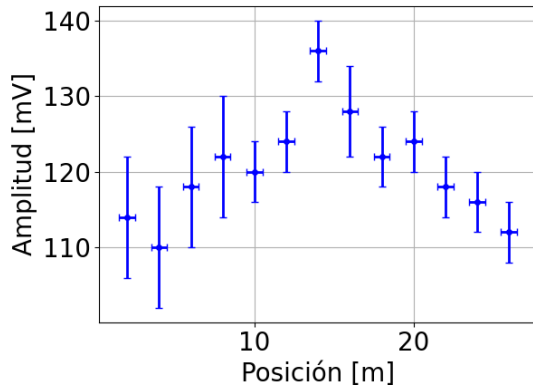
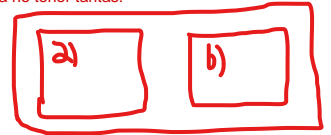


Figura 16: Gráfico de la amplitud de la onda del según emisor en función de la posición del receptor en el riel

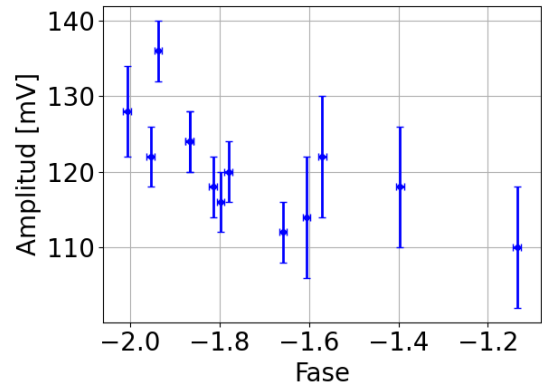


Figura 17: Gráfico de la amplitud de la onda del segundo emisor en función de su fase

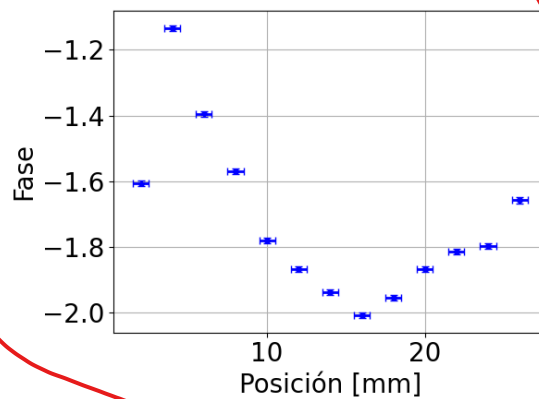


Figura 18: Gráfico de la fase de la onda del segundo emisor en función de la posición del receptor en el riel

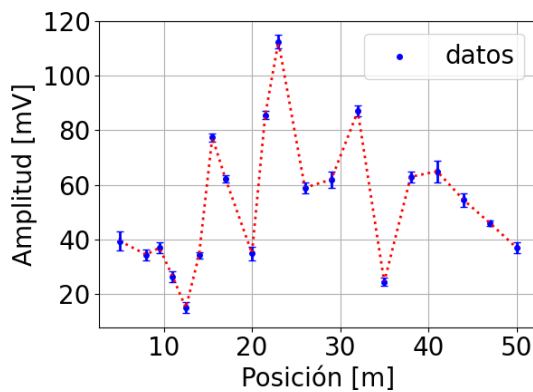


Figura 19: Gráfico de la amplitud de la onda de interferencia en función de la posición del receptor en el riel

Pongan que las líneas punteadas son solo para ayuda visual

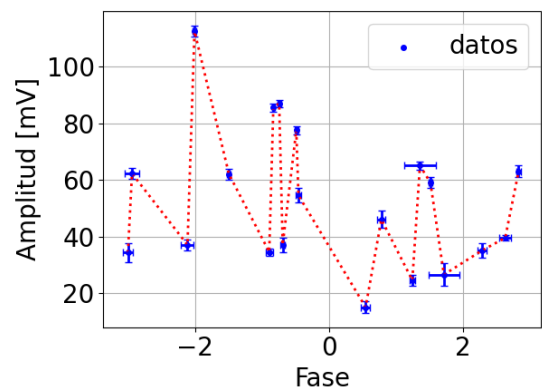


Figura 20: Gráfico de la amplitud de la onda de interferencia en función de su fase

se encontró que la longitud de onda es,

$$\lambda = (8,828 \pm 0,004) \text{ mm} \quad (18)$$

Para el tercer experimento se buscó medir el decaimiento de la amplitud en función de la distancia. Se observó que la señal oscilaba, entonces se tomaron datos en los máximos y mínimos de la señal, y ajustando los datos se llegó al resultado de que la amplitud se puede describir como

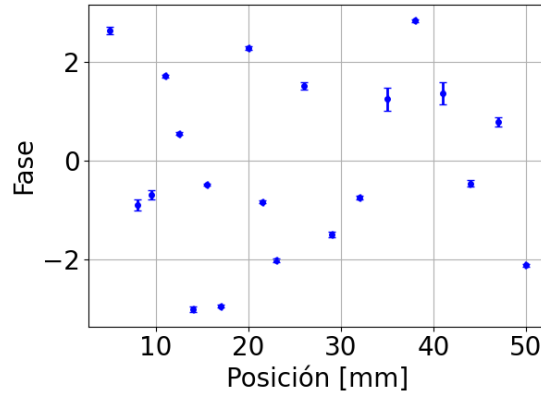


Figura 21: Gráfico de la fase de la onda de interferencia en función de la posición del receptor en el riel

$$Amp(r) = B/r^n \quad (19)$$

con

$$n = (1,195\,767 \pm 0,000\,001) \quad (20)$$

Para el cuarto experimento se buscó determinar el decaimiento de la amplitud en función del ángulo. Estos resultados, por complicaciones en las mediciones fueron inconclusos.

Para el quinto experimento, se buscó medir la velocidad de propagación del sonido en el aire, y se encontró que la misma es,

$$v = (343,8 \pm 0,2) \text{ m/s} \quad (21)$$

Luego, en los experimentos de interferencia, los resultados fueron consistentes con la teoría, pero no se pudo analizar en profundidad la relación entre las mediciones separadas y la del patrón de interferencia por problemas con la colocación inicial de uno de los emisores.

Referencias

- [1] Oscar E. Martínez. *Ondas: Es Física*. 2008.