

Tubo de Kundt

Velocidad del sonido-Análisis de Fourier.

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias, Lab. Acústica

Física

Luis Daniel Ortiz Sebastián
Dante Alberto Espinosa Rosas

En éste trabajo hemos visto el comportamiento de las ondas acústicas en el tubo de Kundt. El sonido son ondas longitudinales, el tubo de Kundt es una guía de ondas que permite visualizar qué es el sonido. Pudimos notar que es una perturbación en el aire, de hecho, son cambios de presión. Sabiendo esto, hemos podido realizar cambios de presión en el tubo y propagar una onda para observar que cambia su frecuencia. Conociendo la teoría de propagación de ondas pudimos conocer la velocidad del sonido en el aire. Adicionalmente, vimos el comportamiento de la transformada de Fourier de la señal propagada dentro del tubo, y notamos la importancia ésta, pues permite profundizar y ver con mayor agudeza lo que ocurre con la señal propagada, lo cual no es posible analizando directamente la señal misma. A través de ésta herramienta, pudimos ver el fenómeno de resonancia.

Objetivos:

Analizar la propagación de ondas acústicas en el tubo de Kundt.

Determinar la velocidad del sonido en el aire.

Visualizar el fenómeno de resonancia.

Observar el comportamiento de las ondas acústicas al cambiar la presión del medio de propagación.

Observar la transformada de Fourier de la señal propagada en el tubo de Kundt e interpretarla.

Fundamentos Teóricos.

El objeto de estudio en este experimento es el movimiento ondulatorio en el interior del tubo de Kundt, la formación de ondas estacionarias acústicas dependiendo de la frecuencia y la longitud del tubo y de si es abierto o cerrado. Para ello se pueden calcular los parámetros característicos de la onda, como son la longitud de onda y su velocidad de propagación (velocidad del sonido). Aparte, es posible estudiar la variación de la amplitud alrededor de la frecuencia de resonancia.

El tubo de Kundt es un cilindro largo y estrecho en el que se pueden generar sonidos si se hace vibrar la columna de aire de su interior. Una perturbación inicial hace propagarse una onda longitudinal que desplaza a las moléculas alrededor de su posición de equilibrio. Esto origina una variación de la presión a lo largo del tubo. Hay zonas donde hay una sobre-presión (compresión) y otras en las que hay baja presión (enrarecimiento).

Al llegar a un extremo del tubo, sea abierto o cerrado, la onda se reflejará, interferirá con la incidente y formará ondas estacionarias para determinadas frecuencias propias. Podemos describir la onda acústica o bien como el desplazamiento de las moléculas respecto a su equilibrio o con la presión en cada punto del tubo. Cuando se forma la onda estacionaria, en las posiciones en las que el desplazamiento de una molécula (amplitud) es máximo, las moléculas a su alrededor vibran en fase, con lo que la presión es mínima. Si la molécula está en su posición de equilibrio, las moléculas a su alrededor vibran en oposición de fase, con lo que la presión es máxima. Por tanto, máximos de presión corresponden a mínimos de desplazamiento y viceversa; las dos ondas están desfasadas en $\pi/2$. Cabe indicar que se aproxima la columna de aire como unidimensional, sin tener en cuenta efectos de volumen y contorno lateral.

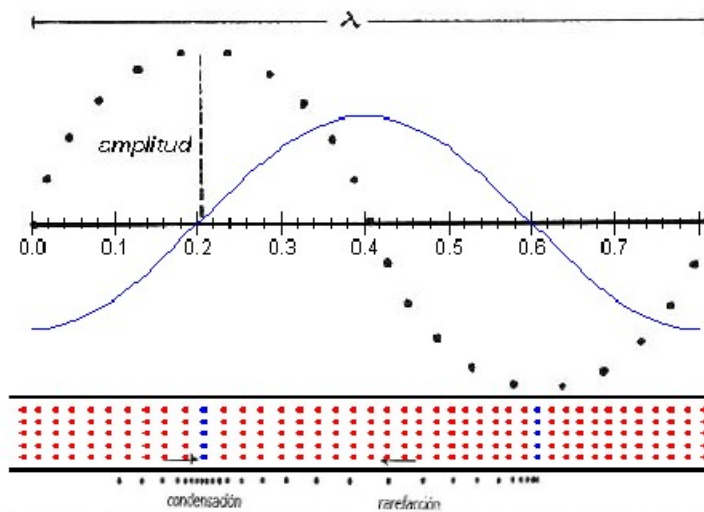


Figura 1 - Onda de presión (negra) y de desplazamiento de las moléculas respecto al equilibrio (azul)
Nota: Ambas están desfasadas en $\pi/2$.

En el caso de que la onda llegue a un extremo cerrado del tubo, en ese punto el desplazamiento de las partículas ha de ser siempre nulo, y se producirá una reflexión de la onda con inversión de fase que interferirá con la onda incidente. En el caso de que se forme una onda estacionaria, tendremos un nodo para la onda de desplazamiento y un vientre para la onda de presión. Si el extremo del tubo es abierto, la reflexión es más compleja, pero si se emplea un tubo estrecho en comparación con la longitud de onda λ (dos veces la distancia entre nodos contiguos), en el extremo abierto habrá un vientre en la onda de desplazamiento.

En el caso de un tubo con los dos extremos cerrados, hay un nodo en ambos extremos, con lo que el modo fundamental será un solo vientre en el centro del tubo. Por tanto, la longitud del tubo corresponderá a una semilongitud de onda. El modo armónico siguiente tendrá tres nodos y dos vientres, con lo que la longitud del tubo corresponderá a tres semilongitudes de onda, y así sucesivamente. Se puede relacionar, por tanto, la longitud de onda con el número de nodos (incluidos los extremos):

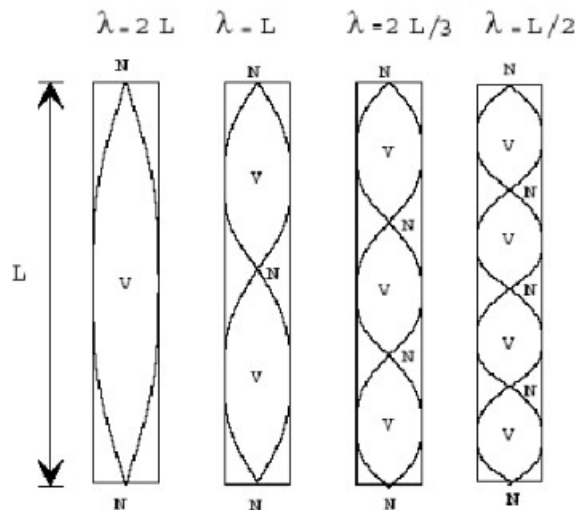


Figura 2 - Ondas estacionarias en el tubo cerrado por ambos extremos. Cuatro primeros armónicos.

$$L = (n-1)\frac{\lambda}{2}, \quad n = 2, 3, \dots \quad [1]$$

En un tubo abierto por los dos extremos, la condición es similar pero cambiando número de nodos por vientres. Si tenemos un tubo cerrado por un extremo, la onda estacionaria más simple consta de un nodo en el extremo cerrado y un vientre en el abierto. Este caso sería el armónico fundamental, y la longitud del tubo correspondería a un cuarto de longitud de onda. El siguiente armónico tendría dos nodos y un vientre, es decir, tres cuartas partes de longitud de onda.

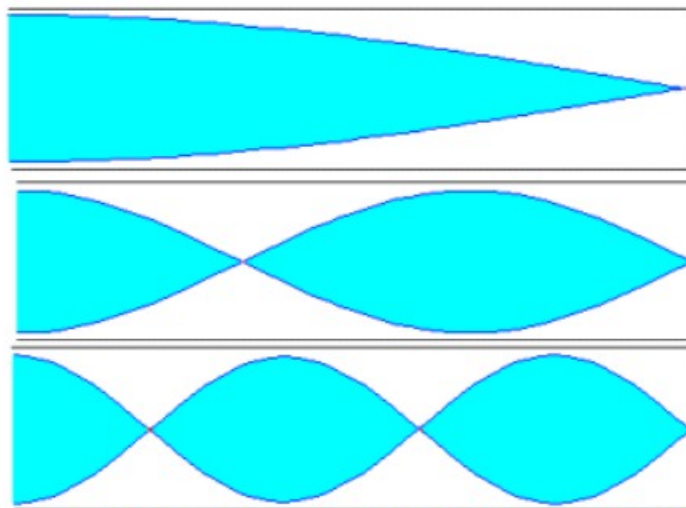


Figura 3 - Ondas estacionarias en el tubo abierto por un extremo.

En general, si en el interior hay n nodos:

$$L = \frac{(2n-1)}{4}\lambda, \quad n = 1, 2, \dots \quad [2]$$

En todos los casos, la longitud de onda depende de la velocidad de propagación de la onda y la frecuencia ν , con lo que conociendo la longitud del tubo y la frecuencia es posible calcular la velocidad de propagación v .

$$v = \frac{v}{\lambda} \quad [3]$$

Un sistema resonante donde la amortiguación no se desprecia está caracterizado por la dependencia de la amplitud con la frecuencia, que representada gráficamente presenta un aspecto de curva lorenciana. Esta curva está descrita por una ecuación que se obtiene al resolver la ecuación diferencial de segundo orden inhomogénea correspondiente a un movimiento oscilatorio amortiguado forzado:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = B \sin \omega t \quad [4]$$

El coeficiente β es el factor de amortiguamiento (fuerza viscosa) que determina la velocidad a la que decae la amplitud si no hay aporte de energía, y es la amplitud de la oscilación, ω_0 es la frecuencia propia a la que vibraría sin amortiguamiento ni fuerza forzadora, y el término inhomogéneo corresponde a la fuerza externa armónica.

$$y_p = A \sin(\omega t + \delta) \quad [5]$$

$$A(\omega) = \frac{B}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\beta\omega)^2}} \quad [6]$$

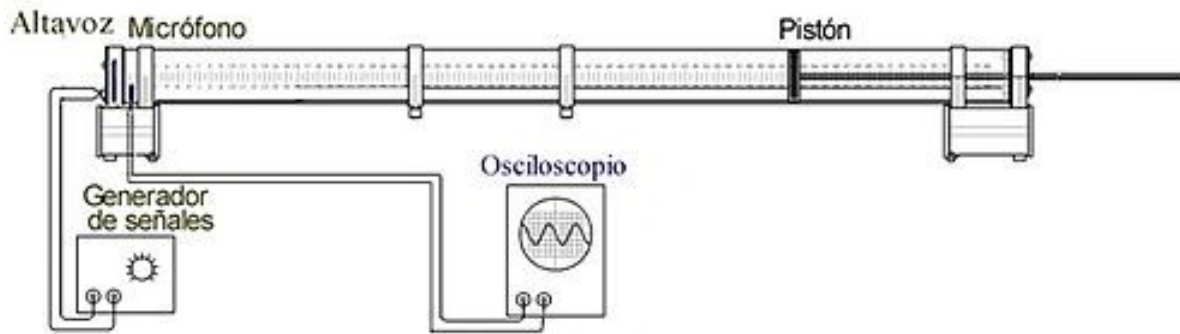
La solución estacionaria (particular) de la EDO, donde tanto A y δ están determinados por las características del sistema, es:

Esta función muestra un pico de resonancia, donde la amplitud es máxima. La anchura de la curva la determina el factor de amortiguamiento: cuanto menor es éste más pronunciado es el pico de resonancia y viceversa. La anchura de la curva se toma como el intervalo entre los valores en el eje de abscisas cuya ordenada es la amplitud máxima (en resonancia) entre raíz de dos. Esta anchura coincide aproximadamente con el factor de amortiguamiento. Además se puede obtener el valor del factor de calidad aproximadamente como la anchura de la curva entre la frecuencia propia.

La Transformada de Fourier es una transformación que nos permite ver una señal analógica que originalmente está en un espacio de tiempo, en un espacio de frecuencias o viceversa.

$$\mathcal{F}(x)(\xi) := \hat{x}(\xi) := \int_{-\infty}^{\infty} x(s) e^{-i\xi s} ds$$

Diseño experimental.



Esquema 1. Diseño experimental del tubo de Kundt

Para obtener la velocidad del sonido hemos observado fijando una frecuencia y variando la longitud del tubo de mayor a menor. Se escoge una frecuencia para la que se observan 10 máximos de presión, que corresponden a 9 vientres en la onda de desplazamiento de las moléculas. Se busca dicha frecuencia para la longitud mayor del tubo $L_t = 100,0\text{cm}$ y se obtiene como valor medio: 1962Hz

Hemos enviado 6 señales diferentes, todas con misma amplitud (5V), y únicamente con distinta frecuencia. Esto lo hemos repetido para distintas configuraciones. Las seis frecuencias fueron: 82.41Hz , 110Hz , 146.83Hz , 196Hz , 246.94Hz , 329.63Hz correspondientes a las seis notas de la afinación estándar de una guitarra. Mi, La, Re, Sol, Si, Mi (Sig. Octava) respectivamente.

Configuración 1: Tubo abierto (sin pistón). Transductor; Micrófono.

Configuración 2: Tubo abierto. Transductor; Piezoeléctrico colocado cercano al altavoz.

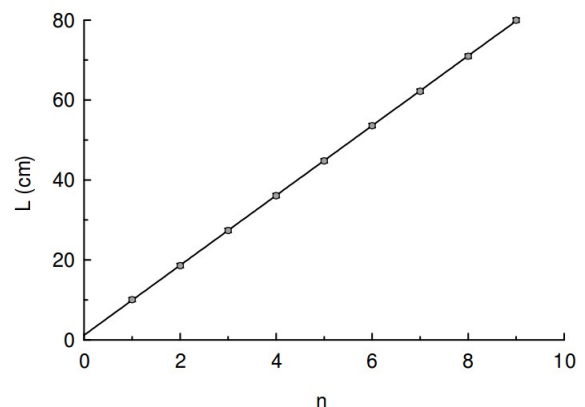
Configuración 3: Tubo abierto. Transductor; Piezoeléctrico colocado lejano al altavoz.

Configuración 4: Tubo cerrado. Transductor; Piezoeléctrico colocado cercano al altavoz.

Configuración 5: Tubo cerrado. Transductor; Piezoeléctrico colocado lejano al altavoz.

Resultados

n	$L \pm 0,5 \text{ cm}$
1	10,1
2	18,6
3	27,4
4	36,1
5	44,8
6	53,6
7	62,2
8	71,0
9	80,0

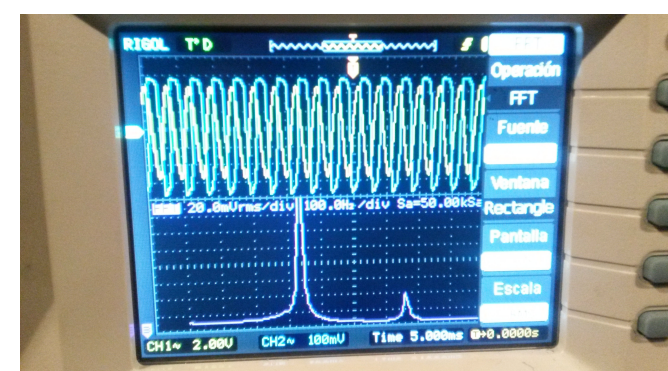
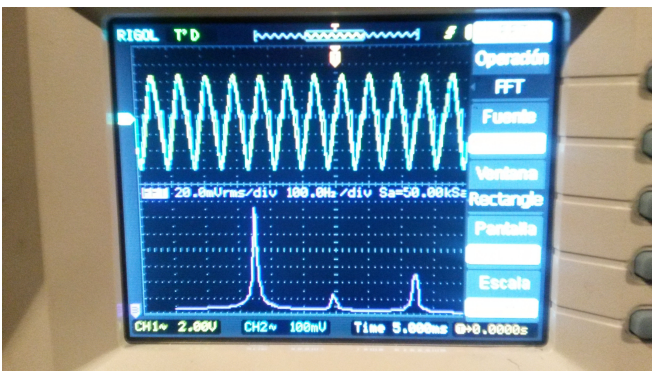
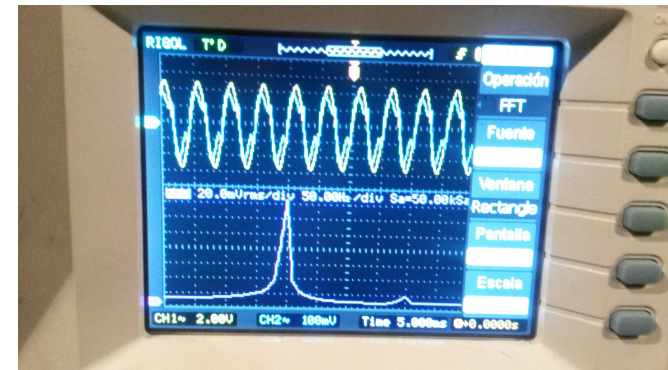
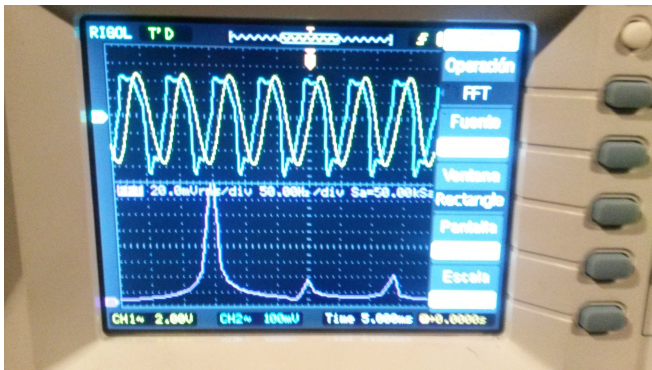
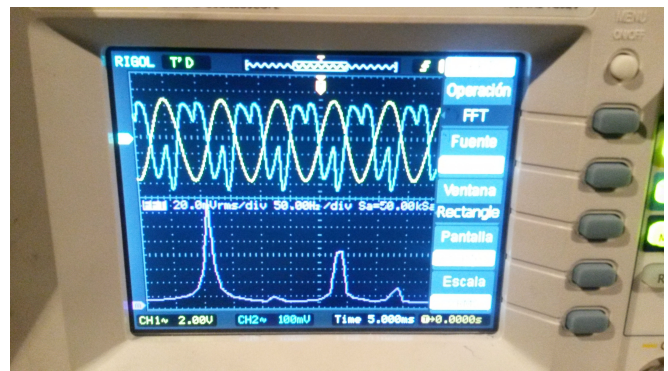
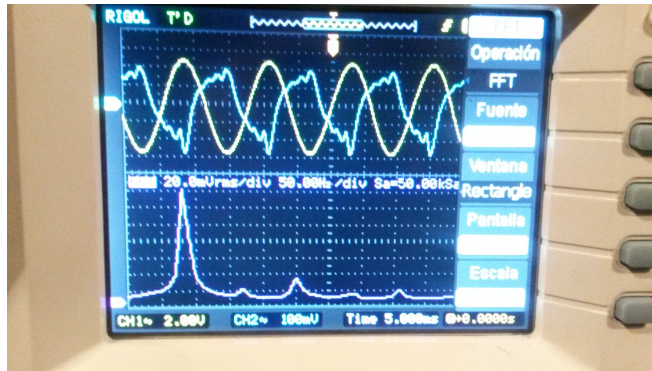


Ecuación de la recta: $L = (8,732) \cdot n + (1,21) [\text{cm}]$

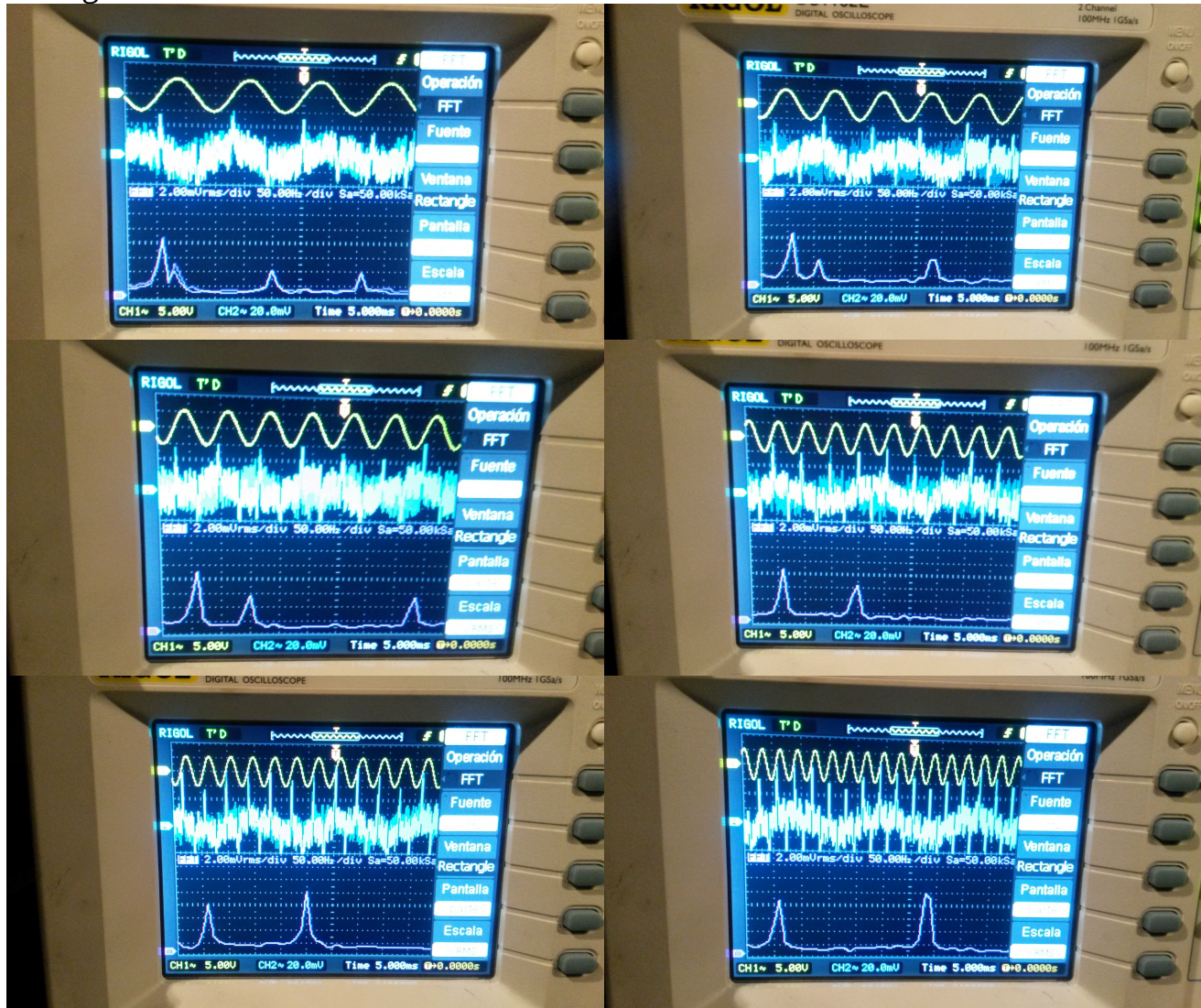
A partir de éstos resultados y la pendiente de la recta, obtuvimos que la velocidad del sonido para empezar no depende de la distancia, de ser así, no tendríamos una recta. Luego entonces el valor de la velocidad del sonido es de 342.6m/s.

Para ver el análisis de Fourier en el osciloscopio, arriba vemos la señal de entrada y la señal propagada, abajo se observa la transformada de Fourier de la señal propagada.

Configuración 1



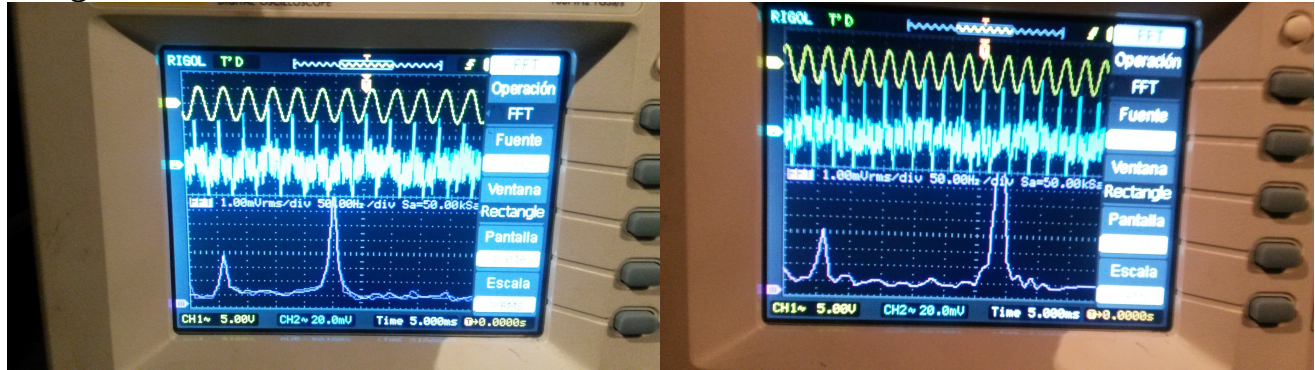
Configuración 2



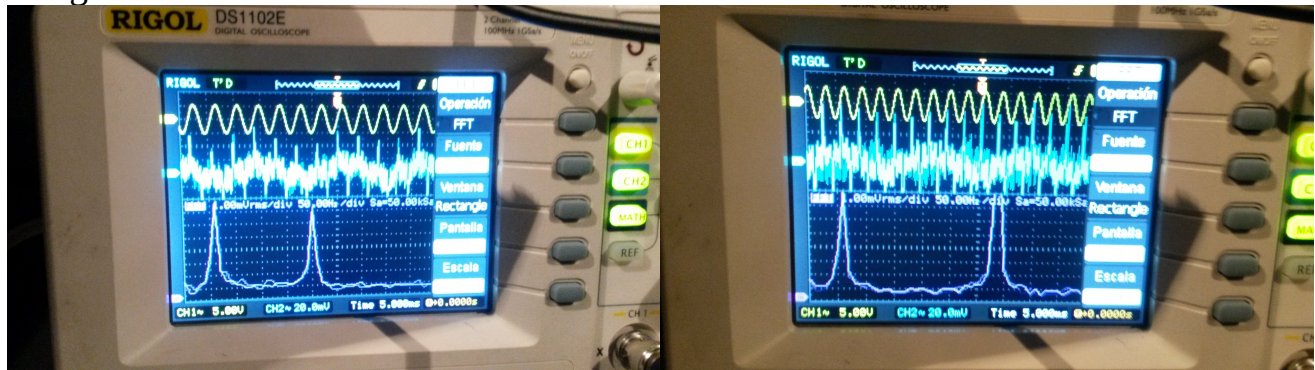
Configuración 3 (En adelante solo mostramos las frecuencias 246.94Hz y 329.63Hz)



Configuración 4



Configuración 5



Superposición de ondas (Efecto de resonancia)



Observe la deformación de la señal propagada.

Conclusiones

La velocidad del sonido, hemos obtenido es de 342.6m/s. Éste valor no depende de la distancia recorrida.

En el micrófono debe resaltarse la deformación de la onda propagada. En general el desfazamiento respecto a la onda enviada, es pequeño. Pero note que la deformación de la señal propagada que llega al micrófono, entre más notoria es, más evidente hace la presencia de otras frecuencias en la misma señal.

Las configuraciones con el piezoeléctrico muestran las perturbaciones sobre el tubo, es decir, ahora no solo estamos considerando las perturbaciones en el aire, si no el cómo hacen vibrar al tubo. Con esto, en los casos en que el piezoeléctrico es cercano a la fuente de sonido, vemos que en la transformada aparecen en su mayoría picos en la frecuencia que estamos enviando, pero cuando el piezoeléctrico es lejano, notamos que además de la frecuencia que enviamos, se puede ver la presencia de otras frecuencias, es decir la señal ya no es limpia pues el mismo tubo presenta vibraciones que también contribuyen a la señal recibida en el piezoeléctrico.

Pudimos observar además el fenómeno de superposición de ondas en la frecuencia de 196Hz, y moviendo el pistón para provocar cambios de presión dentro del tubo. La transformada de Fourier hizo evidente ésta superposición de ondas a pesar de que la señal propagada no parecía cambiar significativamente.

Bibliografía

Tipler-Mosca, 5ª Ed. 2005.; Ed. Reverté; Vol. 1, Apéndice

MOVIMIENTO ONDULATORIO: ESTUDIO DE ONDAS ACÚSTICAS EN EL TUBO DE KUNDT,
Fernando Hueso González

Si desea consultar las fotografías de todas las frecuencias trabajadas en cada configuración realizada para ésta práctica, puede encontrarlas visitando:

<https://www.dropbox.com/sh/cjnf38bxpfdgdwj/AACPTl8cg0u0ieiDjN8d6Z4ea?dl=0>

Tubo de Kundt

Velocidad del sonido-Análisis de Fourier.

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias, Lab. Acústica
Física

Luis Daniel Ortiz Sebastián
Dante Alberto Espinosa Rosas

