

Pasajes de pulsos sonoros en tubos

Maio, Yamila; Leikis, Leandro; Ragozino, José María
E-mail: yamiamio@hotmail.com, lekis@yahoo.com, the_teto50@hotmail.com

Universidad Favaloro. Laboratorio de Física I - 2005

Resumen

En este trabajo se estudia el pasaje de pulsos de ondas acústicas por tubos cilíndricos con variaciones en su diámetro y distintos tipos de terminaciones en sus extremos. En particular, del estudio del tiempo de tránsito de los pulsos a lo largo de tubos lisos de distintas longitudes, se determinó la velocidad del sonido. Este estudio se realizó para tubos abiertos y semicerrados. También se analizó el efecto de la variación del diámetro del tubo en los procesos de reflexión y transmisión de las ondas sonoras. Para la temperatura de 20°C, la velocidad obtenida experimentalmente concuerda con la velocidad esperada.

Introducción

Una onda es una perturbación que se propaga desde el punto en que se produjo hacia el medio que rodea ese punto. Exceptuando las electromagnéticas, todas las ondas requieren un medio elástico para propagarse, el cual se deforma y se recupera vibrando al paso de la onda. Una onda transporta energía pero no transporta materia: las partículas vibran alrededor de la posición de equilibrio pero no viajan con la perturbación. Siempre que una onda se desplace en un medio, pierde energía durante el trayecto, por lo que su amplitud va disminuyendo.

Si la perturbación sobre el medio se produce de forma continuada y regular, produce una onda armónica, representada por una función senoidal. Una única perturbación en el medio origina un tipo de onda llamada pulso. Las partículas oscilan una sola vez al paso del pulso, transmiten la energía y regresan a su estado inicial.

Si las partículas del medio en el que se propaga la perturbación vibran perpendicularmente a la dirección de propagación las ondas se llaman transversales. Si vibran en la misma dirección se llaman longitudinales. El sonido es un ejemplo de éstas últimas. A una temperatura de 20°C, la velocidad establecida del mismo establecida del mismo es de $344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Cuando dos ondas se cruzan, se producen los fenómenos de interferencia que afectan a las partículas que están en el cruce pero no a las ondas, siguiendo el principio de superposición,^{1,2} de manera que cada una sigue su camino sin alterar ninguna de sus características (como forma, dirección, velocidad, etc) ni el valor de la energía transportada.

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de ondas sonoras que viajan por un tubo. Este análisis pretende establecer qué sucede al variar el radio del tubo, su largo, y su condición de rebote en uno de los extremos (tubo abierto o cerrado). Por otro lado, al viajar una onda por un tubo cuyo diámetro cambia bruscamente en una parte del trayecto, entran en juego fenómenos de reflexión y refracción de onda. Esta situación es análoga a lo que ocurre cuando una onda se enfrenta a un cambio de medio, por ejemplo, del aire al agua. Con respecto a esto, se busca estudiar el comportamiento de un

pulso y de los rebotes sucesivos al cambiar de medio. En adición, se busca analizar si existe alguna relación entre las amplitudes del pulso incidente con sus pulsos reflejados. Al utilizar un pulso de onda sonora es más sencilla la colección de los datos, haciendo más simple la evaluación de la conducta del mismo.

Para el caso de un pulso que viaja a lo largo de un tubo de longitud L , si T designa el tiempo de viaje de ida y vuelta del pulso desde un extremo al otro, la velocidad de la onda es:

$$v = \frac{2l}{T} \quad (1)$$

Método experimental

Se generó un pulso de onda mediante el programa Mathematica, con una duración de $500\mu\text{s}$.

El mismo se emitió desde una PC a través de un parlante con amplificador incluido, ya que si bien el sonido generado por este pulso era audible, su intensidad era insuficiente para la correcta realización del experimento. Esta emisión se realizó desde un reproductor sin equalizador para evitar la modificación indeseada del sonido. De todas maneras, se contempla una leve distorsión del sonido debida al amplificador mismo.

Este parlante se colocó en una de las bocas de un tubo a una distancia de un par de centímetros del mismo, de manera que el tubo captase la mayor cantidad de sonido y la menor cantidad de distorsión ocasionada por el amplificador. Próximo al parlante, se situó un micrófono que se conectó a la interfaz MPLI (Multiple Purpose Lab Interface) de una PC.

El MPLI arrojó gráficas de potencial en función del tiempo con una apreciación de 0.00001s . Las mismas presentan picos de potencial que representan la llegada del pulso o de uno de sus rebotes al micrófono. Esa diferencia de potencial es el reflejo de la amplitud del pulso. Los datos de retardo entre los rebotes del pulso fueron fácilmente extraídos.

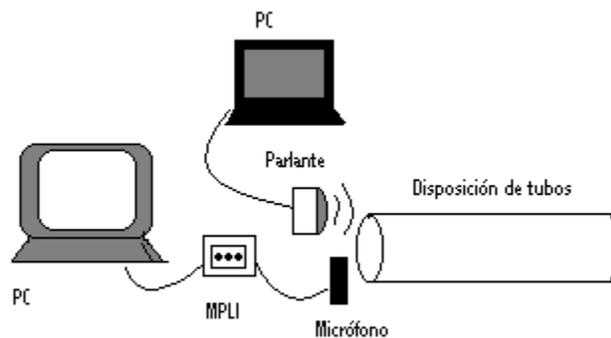


Figura 1. Dispositivo experimental.

El estudio de las variaciones del largo del tubo requirió el mantenimiento de un diámetro constante, mientras que el estudio de las variaciones del diámetro requirió un largo constante. Para el análisis del diámetro, se utilizaron tubos semicerrados.

Para el análisis de cambio de medio, se dispusieron el parlante y el micrófono en la misma salida del tubo, de modo que el pulso transitase de un tubo de diámetro mayor (0.06038m) a otro menor 0.03530m. El largo del tubo de mayor diámetro era de 1.402m y el de menor diámetro era de 2.294m. Ambos extremos estaban abiertos.

Todos los diámetros se midieron con un calibre que poseía una apreciación nominal de 0.00002 m y los largos de los tubos se midieron con una cinta métrica de apreciación 0.001m. Todas las experiencias se realizaron a una temperatura de 20°C.

Resultados y Discusión

Relación entre largo del tubo y tiempo de retardo del pulso

Para cada uno de los cinco tubos se obtuvieron intervalos de tiempo entre los picos y con éstos se calculó el retardo característico para una longitud de tubo dada. El siguiente gráfico representa los retardos entre picos para cada largo de tubo. El retardo es el tiempo que tarda la onda en recorrer todo el tubo y volver hacia el micrófono; es por eso que se graficó el retardo en función de dos veces el largo del tubo.

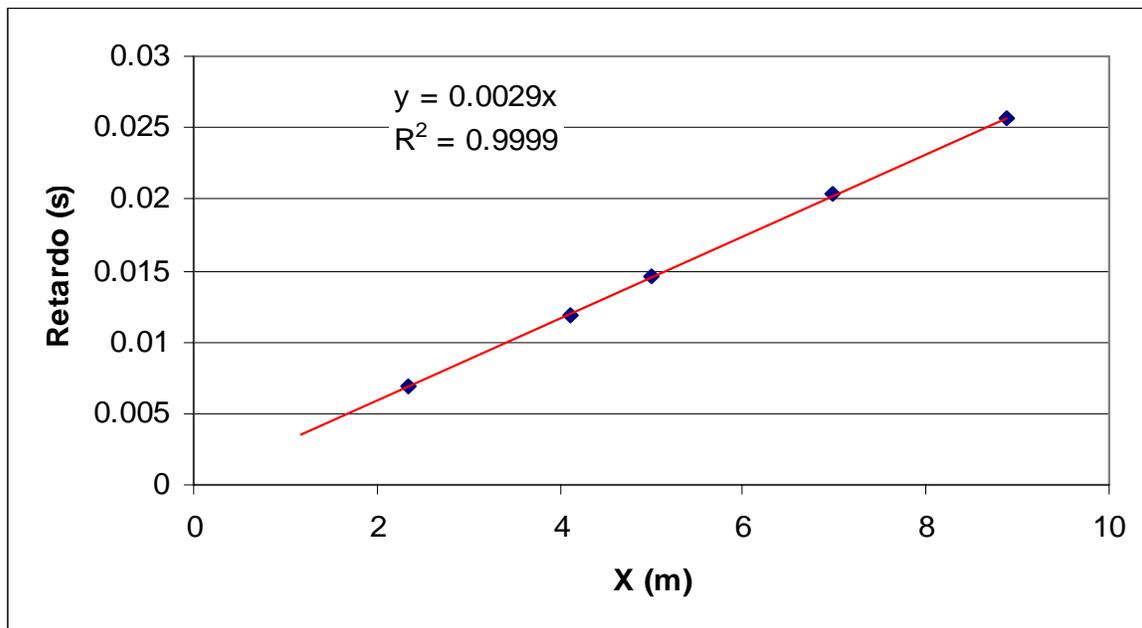


Figura 2. Relación entre el largo de los tubos y el tiempo de retardo entre picos consecutivos.

Se puede apreciar que a medida que se aumenta el largo del tubo, el retardo entre cada rebote captado por el micrófono aumenta también en forma lineal. El análisis de regresión muestra que la ordenada al origen arrojada por la linealización tiene un error típico mayor que el valor mismo, por lo que la misma es despreciable.

Dado que en este gráfico hay una relación lineal entre distancias dadas por los largos de los tubos y tiempos dados por los retardos entre picos, se puede afirmar que hay involucrada una velocidad constante. Esta es la velocidad del sonido, la cual se obtiene realizando la inversa de la pendiente.

Comportamiento del pulso de onda en un tubo abierto y un tubo semicerrado

Para esta experiencia se hizo hincapié en que el largo del tubo no se viera afectado por la colocación de una tapa. Se optó por un tubo lo suficientemente largo para que los

retardos entre picos estuviesen bien separados (como consecuencia de la conclusión arribada anteriormente) y se apreciara claramente la conducta del pulso.

Las imágenes mostradas a continuación corresponden a una sección del gráfico total arrojado por el MPLI.



Figura 3. Comportamiento de una onda en un tubo con ambos extremos abiertos, con el parlante y el micrófono en el mismo extremo.

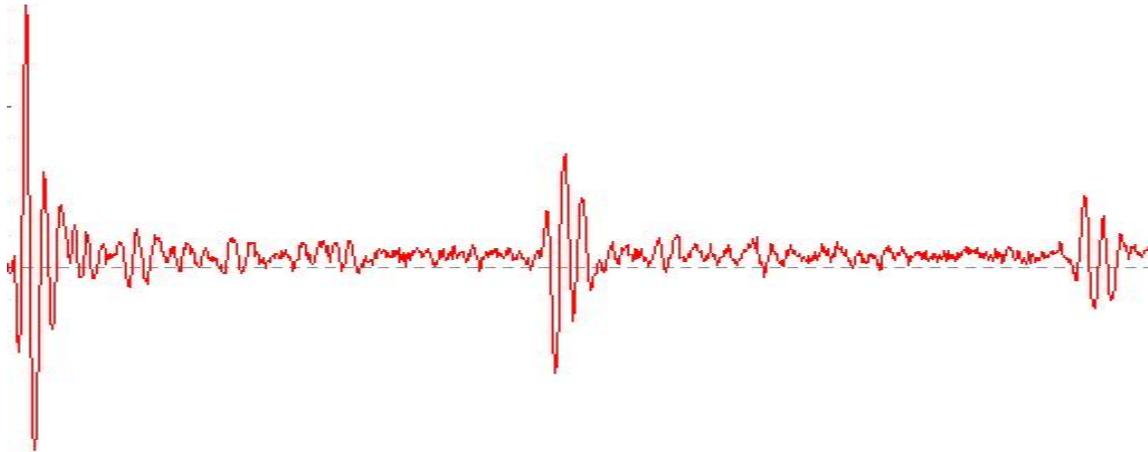


Figura 4. Comportamiento de una onda en un tubo con un extremo cerrado, con el parlante y el micrófono en el mismo extremo.

Se puede observar que en la figura 3 cada pulso es, en cuanto a su forma, una réplica del pulso anterior, mientras que en la figura 4, cada pulso es una inversión del pulso anterior. Para explicar este comportamiento se define la impedancia característica o resistencia de un medio. Esta está dada por la densidad del medio y la velocidad del sonido en el mismo.

En el extremo del tubo se pueden pensar en dos medios, uno que corresponde al medio dentro del tubo, y el segundo al del exterior. Si el segundo es muy denso (su impedancia es muy alta), como en el caso de la tapa del tubo, no se presenta un desfase entre la onda reflejada y la incidente. Ahora bien, si el segundo medio es enrarecido en comparación con el primero, como en el caso de un tubo abierto, si bien no hay un cambio de medio físico, su impedancia es mucho menor. Esto produce una inversión entre la onda incidente y la onda reflejada.

En el dispositivo experimental, el micrófono y el parlante se encontraban en el mismo extremo del tubo. En el caso del tubo abierto, el pulso sufre un desfase en ambos extremos; en consecuencia la lectura del micrófono mostró siempre un pulso con la

misma forma. En el caso del tubo cerrado, solo se produce un desfase en uno de los extremos, por lo que el gráfico 4 muestra pulsos alternados.

Al calcular los retardos para ambos casos, se notó claramente que el correspondiente al tubo abierto era mayor. Este fue un resultado no esperado, dado que se había prestado sumo cuidado en que el largo de los tubos no variara. Se consultó bibliografía correspondiente³ de la cual surgió una ecuación explicativa de los casos de tubos abiertos. En estos casos, el rebote no se produce en el límite exacto del extremo del tubo, sino a una distancia Δl fuera del mismo. El trabajo consultado explica que la distancia depende directamente del radio del tubo, y es igual a:

$$\Delta l = 0.6133R \quad \text{Ec. (2)}$$

donde R es el radio del tubo y el 0.6133 fue obtenido experimentalmente, pero no se incluye en el trabajo consultado el error asociado.

El agregado de este largo adicional al largo del tubo medido, logró explicar los datos obtenidos. Es así, que el tubo abierto de longitud l equivale a un tubo cerrado de longitud $l + \Delta l$, sólo en cuanto a los retardos. El comportamiento de la onda al reflejarse es el explicado anteriormente.

Comportamiento del pulso para distintos radios de tubo

Para cada tubo de un radio determinado, se extrajeron los retardos entre picos y al graficar la distancia recorrida ($2l$, $4l$, $6l$...) en función del tiempo, se obtiene como pendiente de la linealización de los datos, la velocidad del sonido en cada tubo (una gráfica inversa a la Figura 1). La siguiente figura muestra las velocidades en función de los radios.

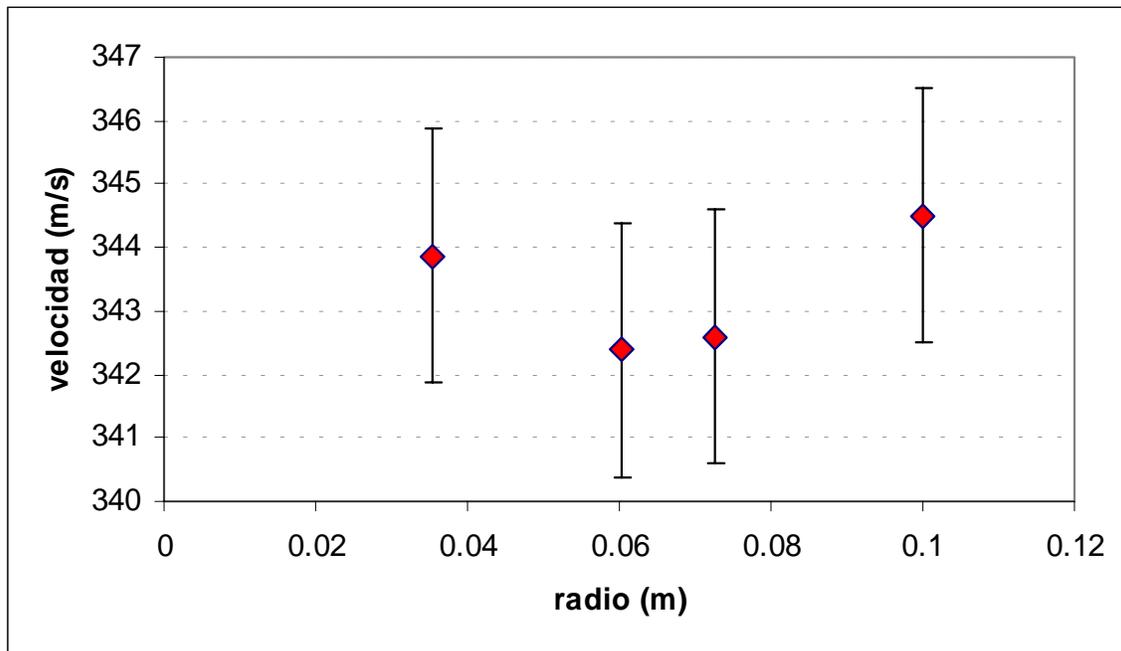


Figura 5. Relación entre la velocidad del sonido y el diámetro del tubo.

La figura 5 pone en evidencia que la velocidad del sonido se mantiene constante para los distintos radios de tubos semicerrados. Esta conclusión no surgió solamente del hecho de

que todos los valores de las velocidades son similares, sino de que las barras de error de cada dato, incluyen a todas los demás datos.

Estas barras de error provinieron de hacer la propagación de error de la Ec. 1. Se obtuvo así que el valor de la velocidad del sonido es de:

$$v = (343 \pm 2)\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Además del error indicado, se contempla la existencia de un error asociado a la distorsión del parlante, difícil de cuantificar, que produjo errores a la hora de medir los retrasos de tiempo.

La velocidad obtenida concuerda con la establecida de $344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Comportamiento de un pulso de onda al cambiar de medio

Cuando un pulso de onda viaja a través del dispositivo, dentro del mismo se producen fenómenos de reflexión y refracción, por lo que en una primera instancia el la figura 7 puede parecer caótica. Pero un claro seguimiento de los pulsos y de sus correspondientes bifurcaciones permite determinar con exactitud a qué corresponde cada señal captada por el micrófono.

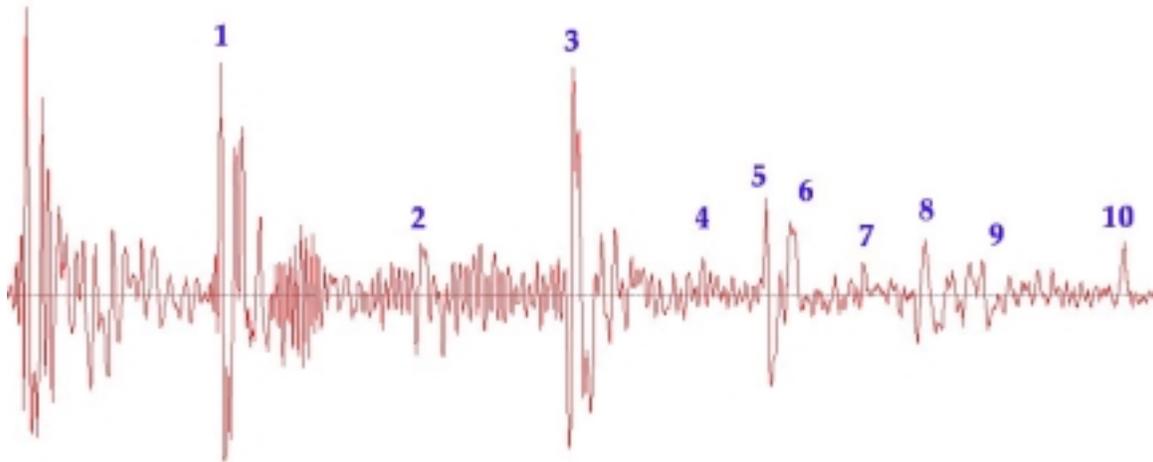
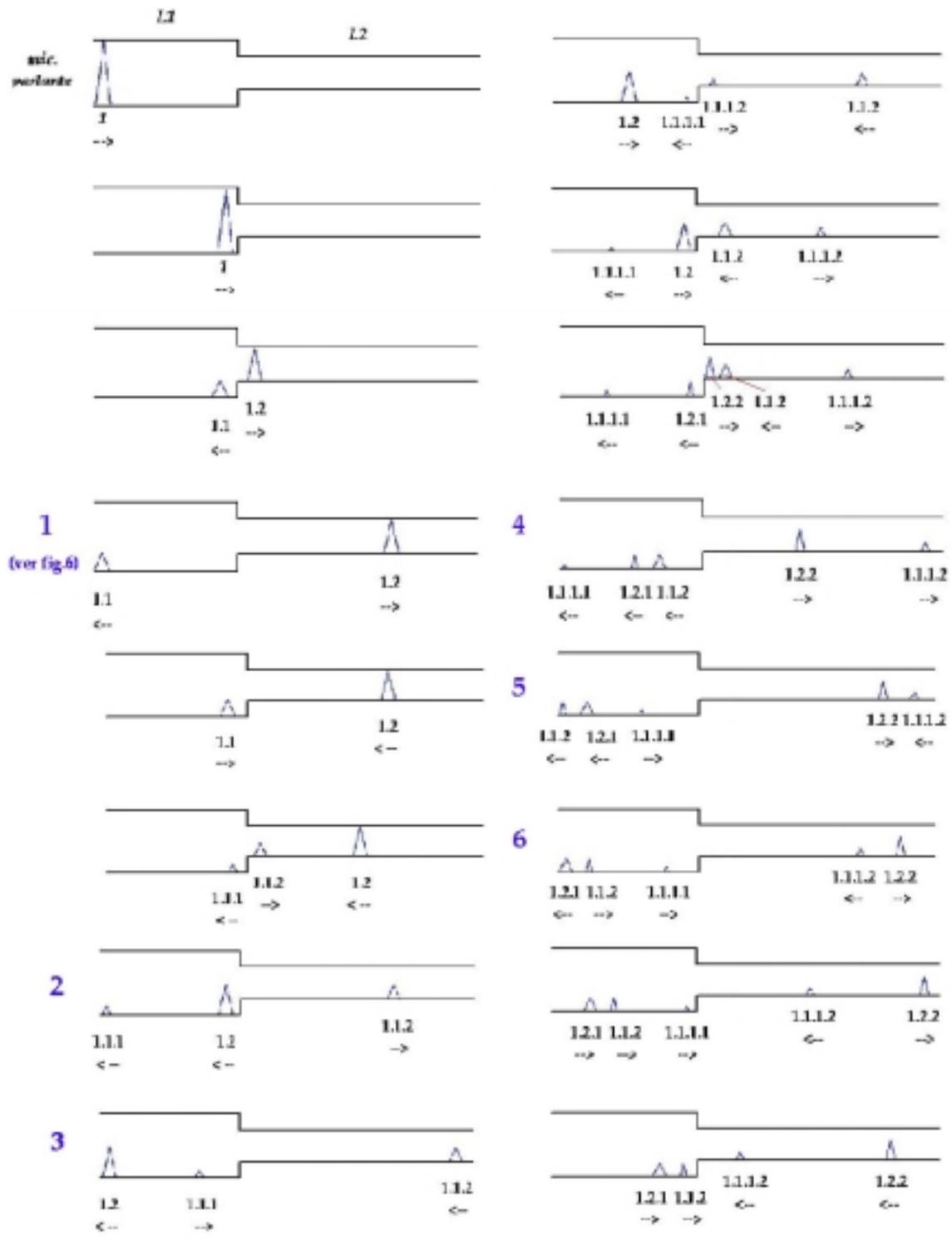


Figura 6. Comportamiento de un pulso de onda en un cambio de medio, emitiendo desde el tubo de radio mayor al de radio menor.

El conocimiento de las longitudes que corresponden a cada tramo del dispositivo y el uso de la Ec. 1, permitieron determinar qué tiempo después del primer pico llegaron los primeros rebotes al micrófono, de acuerdo al largo l que habían recorrido. A partir de entonces, los demás picos consecutivos, requirieron cálculos más complejos para determinar este tiempo, puesto que hubo que tener en cuenta qué pulso les dio origen.

Se tuvo en cuenta el resultado hallado en la sección anterior que expresa que la velocidad del sonido para estos cambios de radio no varía, es por eso que se tomó para realizar los cálculos como $(343 \pm 2)\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

El siguiente esquema, muestra cómo se originan y cómo llegan los picos al micrófono, a la vez que muestra a qué sección de la figura 6 corresponden.



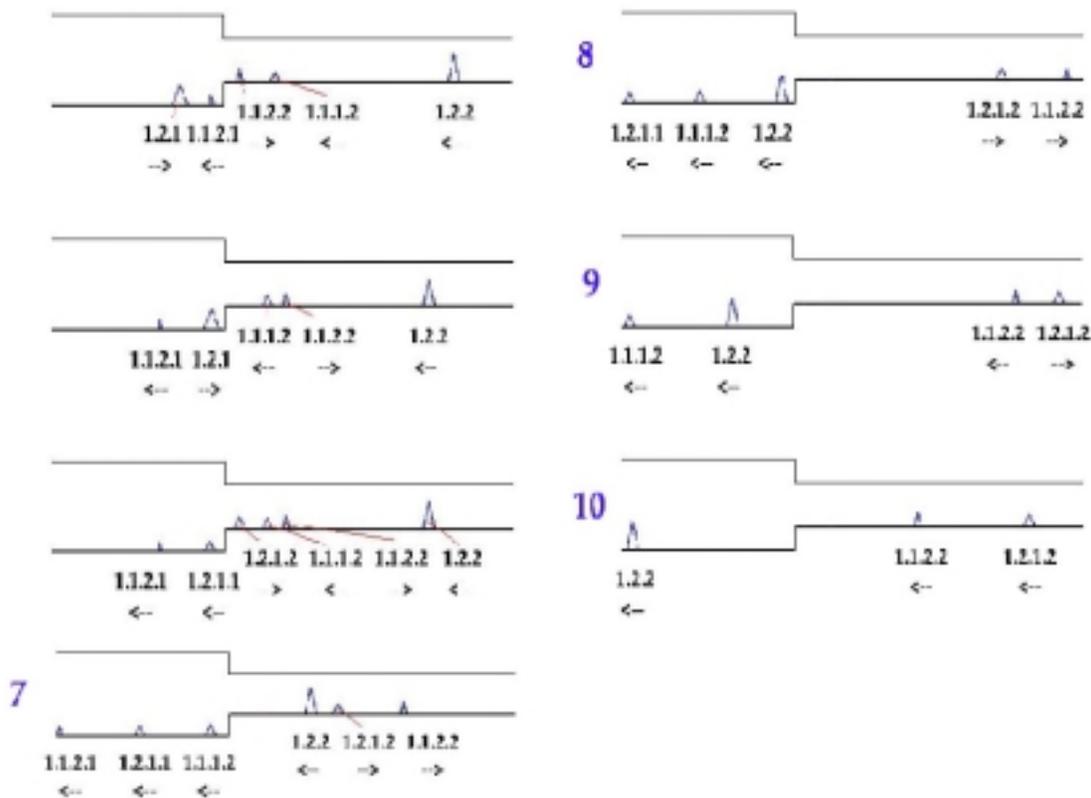


Figura 7. Esquema de la conducta del pulso y de sus sucesivos rebotes al cambiar de medio.

Los cálculos teóricos realizados para obtener los tiempos, se corresponden con la teoría, puesto que los valores hallados concordaron con lo arrojados por el MPLI. La conducta de los picos respecto a la cantidad de rebotes que sufrieron en el dispositivo se manifiesta en la figura 7 por la cantidad de cifras asignadas a cada uno. Es decir que a mayor número de cifras, menor amplitud se registró para dicho rebote. Al aparecer una cifra nueva en un pulso en la figura 7 se entiende que la misma ha pasado del tubo ancho al más angosto.

Resulta interesante analizar en forma cualitativa qué expresan las amplitudes tan poco regulares que se aprecian en la figura 6. Para ello es necesario introducir el concepto de coeficiente de reflexión y transmisión de la potencia sonora. Estos índices permitieron determinar qué cantidad de una onda incidente, sometida a una situación de cambio de medio, es reflejada o transmitida al medio siguiente. Los mismos dependen tanto del área transversal de los medios como de su impedancia característica¹. Para este caso el coeficiente de reflexión es de $\alpha_r = 0.24$ por lo que el coeficiente de transmisión es de 0.76. Esto implica que aproximadamente el 25% del pulso fue reflejado mientras que el resto pasó al próximo medio. Hay que tener en consideración que estos valores no pueden ser medidos con precisión y si bien, el comportamiento real de los pulsos sigue la tendencia propuesta por la teoría, se necesitaría instrumentación más precisa para el captado de diferencias de potencial.

Si la última de las cifras asignadas a un pico en la figura 7 es un 2, el pulso fue transmitido al medio del tubo más angosto, por lo que su amplitud representa aproximadamente un 75% de la amplitud del pulso incidente.

Conclusiones

La experiencia realizada permitió dilucidar varios aspectos del comportamiento de un pulso sonoro en un tubo. La primera conclusión directa a la que se arriba es que la relación entre el largo del tubo y el tiempo de retardo entre los rebotes del pulso es lineal, por lo tanto de velocidad de viaje del pulso en constante.

El radio del tubo por el que viaja un pulso no influye sobre la velocidad del sonido. La misma es constante y es igual a $v = (343 \pm 2)\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Este valor concuerda con el esperado de $344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para una temperatura de 20°C .

Cuando un pulso viaja a través de un tubo con ambos extremos abiertos, al llegar a cada extremo el pulso se invierte.

Cuando el viaje se realiza a través de un tubo con un extremo tapado, el llegar al mismo, el pulso se refleja como una réplica del pulso incidente.

Para poder calcular el tiempo de rebote de un pico al viajar un pulso por un tubo dentro del cual se produce un cambio de medio, además de conocer la velocidad del sonido y la longitud de los tubos, es necesario realizar además un análisis cualitativo de las reflexiones y transmisiones del pulso para comprender el origen de cada rebote.

En la experiencia realizada el coeficiente de reflexión fue de $\alpha_r = 0.24$ por lo que el coeficiente de transmisión es de 0.76.

Para un análisis más preciso que el realizado debería disponerse de un parlante que produjese una distorsión mínima, para evitar así gran parte de los errores de lectura y de un dispositivo para medir diferencias de potencial más preciso, para aseverar los valores de los coeficientes de reflexión y transmisión

Referencias

- (1)Seto, William W. "Teoría y problemas de acústica. Serie de compendios Schaum. " Editorial McGraw-Hill.
- (2) Sears, Zemansky, Young, Freedman."Física Universitaria".Novena edición. Volumen 1.Editorial Pearson Education.1999, México.
- (3)Leonard Yarmus,"Pulsed Waves: Reflection and the speed of sound". Am. J. Phys.,Vol 64. Pag. 903-906. N° 7. July 1996.
- (4) David Potter, "Phase Changes in reflected sound waves", The Physics Teacher, Vol. 41, pag 12-13. January 2003.
- (5)http://www.edu.aytolacoruna.es/aula/fisica/fisicaInteractiva/Ondasbachillerato/ondasCaract/ondas-Caract_indice.htm