

Equipamiento de laboratorio de bajo costo: “Tubo de Rubens”

Federico Prandi – Guillermo Wurm

Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones.
guillermow77@gmail.com

El Tubo de Rubens es un dispositivo que posibilita realizar experiencias de acústica en ámbitos educativos. Con ellas se puede modelizar al sonido como un producto de variaciones de presión que se transmiten en un medio material y poner en evidencia las perturbaciones mecánicas del espacio durante la manifestación de distintos sonidos.

En este trabajo se describe la construcción del equipo utilizando insumos de bajo costo. Se detallan cuestiones referidas a los materiales a emplear y los cuidados necesarios a tener en cuenta durante su fabricación. Se describen también los fundamentos físicos de su funcionamiento y algunos posibles usos del instrumento didáctico.

Palabras claves: sonido, ondas sonoras, ondas estacionarias, equipo de laboratorio.

The Ruben's Tube is a device that allows to perform acoustic experiences in educational settings. With them, sound can be modeled as a product of pressure variations that are transmitted in a material medium and highlight mechanical perturbations of space during the manifestation of different sounds. This paper describes the construction of the equipment using low-cost inputs. It details issues relating to the materials used and care necessary to keep in mind during its manufacture. It also describes the physical principles of operation and some possible uses as educational tool.

Keywords: sound, sound waves, standing waves, laboratory equipment.

Introducción

Ante la necesidad de abordar el eje temático “ondas sonoras”, se presentan ciertas dificultades que impiden una clara apropiación del fenómeno por parte de los alumnos, que tienden a restringirlas a ondas transversales y visibles exclusivamente.

Esta dificultad a la que se hace referencia se debe en parte a la imposibilidad de visualizar el avance de la onda longitudinal en el medio, o su sola presencia en él. Al introducir en la clase el concepto de onda, por lo general la primera idea que se suscita en los alumnos es la de una onda producida por una piedra en un estanque de agua o las ondas formadas en una cuerda perturbada, lo cual es un ejemplo de onda *transversal*. Esto ya en cierta medida dificulta la comprensión del fenómeno que se quiere abordar: una onda *longitudinal*. Además, las representaciones de las ondas

longitudinales en los ejes cartesianos, ya sea como diferencias de presión o de desplazamiento en función de la posición, pueden dar nuevamente una clara imagen de una onda transversal, obstaculizando de nuevo la interpretación de que la perturbación se produce aquí en la dirección del avance de la onda, y no en dirección normal a ella.

Se torna así un tanto complicada la explicación de fenómenos tales como la propagación de la onda en un medio físico (ya sea si se la considera en términos de presión o bien de desplazamiento de las partículas materiales), ondas estacionarias, frecuencias fundamentales, velocidad de propagación; entre otros varios temas ligados a las ondas longitudinales.

El propósito de este trabajo es por un lado mostrar los elementos de bajo costo y los cuidados necesarios para la construc-

ción de un Tubo Rubens, y por otro proponer algunos ejemplos concretos de experiencias que pueden realizarse con él en ámbitos educativos formales.

Se sostiene que un equipo de esta naturaleza, que pone en evidencia la presencia de una perturbación en un medio gaseoso, puede resultar útil no sólo para despertar el interés de los alumnos, sino fundamentalmente para subsanar los obstáculos ligados a las ideas intuitivas subyacentes en los alumnos acerca de las ondas.

Cabe señalar que el contenido *ondas sonoras* se encuentra incluido en el Diseño Curricular Jurisdiccional del Ciclo Secundario Orientado, aprobado para Misiones en el año 2012, en los contenidos de “Física II”; espacio curricular propio de la Orientación en Ciencias Naturales. En él encontramos:

Eje 1:

- *Ondas: Portadoras de energía:*

Tipos de ondas. Características. Ecuación de la onda. Propiedades: Reflexión, Refracción, Difracción. Ppio. de Huygens.

- *Acústica:*

Ondas Sonoras. Intensidad del sonido. Características. Timbre. Reflexión y Refracción. Efecto Doppler”. (Ministerio de Cultura, Educación, Ciencia y Tecnología, 2012, p.76).

En la próxima sección se muestran los materiales y los cuidados necesarios para la construcción del equipo. Seguidamente se desarrollan los fundamentos teóricos relacionados con ondas estacionarias longitudinales. Continuamos con la descripción de algunas actividades que pueden realizarse con el equipo. Finalmente se presenta una breve síntesis.

Construcción del equipo

Para la construcción del equipo, se necesitan los siguientes materiales mínimos:

- Tubo de metal: de 40 mm a 50 mm de diámetro y 1,50 m a 1,80 m de longitud.

- Membrana elástica (globo o piñata).
- Mecha de acero de 1 mm.
- Abrazadera.
- Junta aislante (junta de motor, etc.)
- Adhesivo para juntas de motor.
- Tapa metálica.
- Manguera especial para gas con regulador
- Espiga para la entrada del gas
- Garrafa de 3 kg o 10 kg.
- Pintura apta para resistir altas temperaturas (opcional)
- Altavoz con amplificador.
- PC. y *software* generador de tonos, o reproductor de mp3.

Se aclara que no es imperativo contar con un tubo de las dimensiones que aquí se exponen, pudiendo variar en su diámetro o longitud, aunque no se recomiendan longitudes menores, pues en ese caso no se favorecería la formación de varios nodos y antinodos en las ondulaciones formadas a frecuencias bajas. Incluso puede tratarse de un caño estructural de sección cuadrada u otra; no necesariamente debe ser un cilindro.

Una vez que se cuenta con los materiales, en primer lugar se debe verificar que el tubo no posea perforaciones o picaduras debidas al oxido o a golpes. Si tales agujeros existieren se deberán cerrar completamente mediante soldadura o adhesivo que tolere aumentos de temperatura.

Una vez verificado y limpio el tubo, se le suelda un tapón metálico en uno de los extremos, en el cual a su vez previamente se ha practicado un orificio y se ha soldado una espiga para la conexión de una manguera de gas, tal como muestra la Figura 1. Aquí el trabajo de soldadura debe ser tal que las uniones queden perfectas e impidan así cualquier fuga de gas. Puede ser necesario en este punto recurrir a un soldador de experiencia que realice un trabajo de calidad.

Debemos cerciorarnos cuidadosamente de que no exista ninguna fuga de gas del tubo. Una manera de comprobarlo es tapan

la espiga con un tapón y llenarlo de agua, para controlar así que no exista ninguna pérdida.



Figura 1: Fotografía del extremo del tubo por donde ingresará el gas.

En el siguiente paso, se procederá a marcar el tubo para efectuar las perforaciones a lo largo del mismo. Se hará una línea longitudinal, en la cual se marcarán los puntos donde luego se practicarán los agujeros con la perforadora. Estos puntos estarán distanciados unos de otros una distancia no mayor a 10 milímetros y no menor a 5 milímetros. Para lograr una mayor exactitud es preciso marcar con un punto centro los lugares a perforar. Se insiste aquí en la importancia de mantener equidistantes los agujeros; imperfecciones en este trabajo alterarán el resultado final.

Si bien para efectuar las perforaciones en el tubo, para la salida del gas, puede emplearse un taladro común, es mejor utilizar una perforadora de banco, ya que es muy importante que las perforaciones sean paralelas, y estén bien alineadas, para que luego las llamas sean idénticas y no distorsionen lo que se pretende mostrar.

Se procede luego a perforar cuidadosamente para no romper la mecha partiendo desde el medio hacia los extremos, de manera que en su conjunto las perforaciones queden centradas en el tubo. No se debe llegar con los agujeros hasta los extremos;

dejando aproximadamente 25 a 30 centímetros en ambos extremos de tubo sin perforar.

Luego se pintará el tubo (opcional) utilizando una pintura para altas temperaturas (puede utilizarse aquí pintura para caños de escape, para salamandras, etc.), teniendo especial cuidado de no obstruir con ella ninguno de los agujeros antes practicados. Para ello se deberá taparlos previamente con cinta de pintor, que se retirará luego de la aplicación de las capas de pintura.

En el extremo opuesto al que tiene el ingreso del gas, el extremo abierto, deberá colocarse el globo o piñata, como se muestra en la Figura 2, que actuará como membrana oscilatoria y transmitirá las vibraciones al interior del tubo.

Existe el riesgo de que, durante el funcionamiento, el tubo metálico se caliente al punto de dañar el globo, resultando esto en un posterior escape de gas y el consiguiente peligro que esto acarrearía.

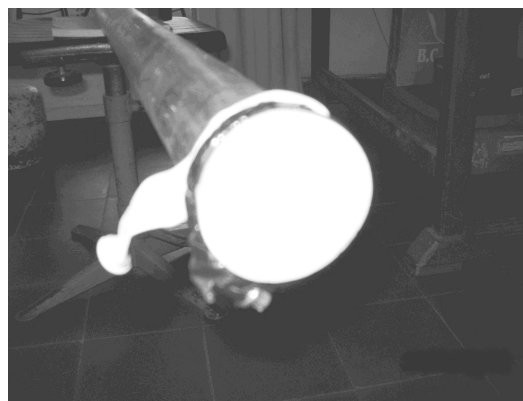


Figura 2: Fotografía del extremo del tubo obturado con membrana plástica

Para que ello no suceda, se debe pegar con el adhesivo una tira de junta aislante en torno al extremo abierto, de manera que el globo no entre en contacto directo con el tubo. Tanto el adhesivo como el trozo de junta pueden conseguirse el cualquier taller mecánico. Bastará una tira de junta de tapa de cilindros, o junta de cárter, etc.;

teniendo cuidado de no elegir una muy fina.

Luego se fijará el globo a este extremo mediante la abrazadera, por sobre la junta. No debe haber partes del globo en contacto con el metal.

El lugar donde se pondrá en funcionamiento el dispositivo debe estar libre de corrientes de aire, por lo que es importante cerrar las ventanas o puertas cercanas. También debe tratarse de una habitación con poca iluminación, en aras de una mejor visualización del comportamiento de las llamas. Se tendrá especial cuidado de alejar del lugar cualquier material inflamable, potencialmente peligroso. Siempre es bueno, antes de comenzar, repasar mentalmente el procedimiento a seguir, lo que se espera que suceda y lo que puede llegar a suceder; y prever los pasos a seguir en caso de una contingencia. Para poner en funcionamiento el equipo, se encenderá primeramente la PC, y se enviarán tonos de prueba al altavoz. Luego de esto, se encenderá el tubo.

Se abrirá muy lentamente la garrafa (teniendo en cuenta que el gas en su interior se encuentra a alta presión y que muy poca apertura es suficiente para lograr el efecto

deseado), y se encenderá el gas que escapa por los orificios del tubo.

Luego, una vez que se encendieron todas las perforaciones y las llamas han alcanzado una altura uniforme, se emitirán sonidos desde el altavoz a través del programa generador de tonos. Manipulando la llave de salida de la garrafa y el volumen del reproductor, se regulará el tamaño de las llamas a una altura que permita apreciar la forma de la onda deseada.

Habiendo concluido estos pasos, se procederá a la colocación del tubo en posición horizontal, ya sea sobre una mesa o soporte (tener en cuenta que el metal se calentará por efecto de las llamas). Frente al extremo que tiene el globo, se colocará el altavoz conectado a la PC. Se puede utilizar aquí un parlante pequeño de PC que ya incluya un amplificador de sonido. A continuación se muestra, en la Figura 3, un esquema del equipo completo.

El altavoz deberá estar muy próximo al globo, si es posible estableciendo un ligero en contacto con él. El otro extremo se conectará entonces al suministro de gas. Es recomendable que el parlante tenga un diámetro similar al del tubo, pueden utilizarse parlantes de PC ya que estos incluyen una etapa amplificadora de sonido.

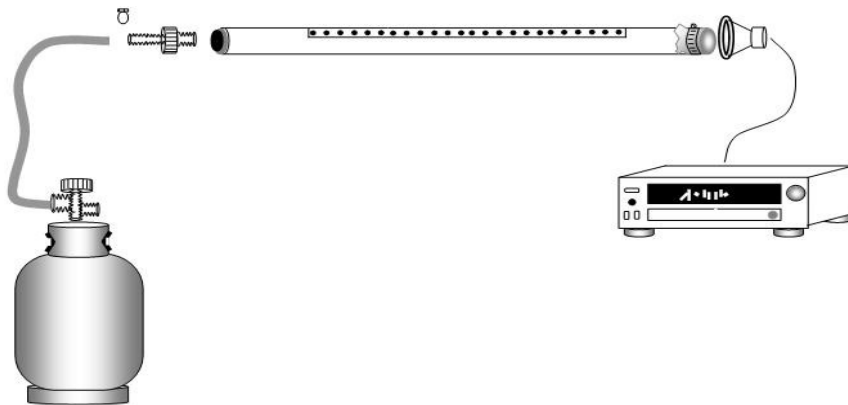


Figura 3: Esquema de Tubo de Rubens

Si se deseara construir un equipo de dimensiones mayores a las sugeridas anteriormente se recomienda soldar dos espigas de gas en la parte inferior del tubo como se indica en la Figura 4.

La distancia entre las espigas y los extremos debe ser aproximadamente igual 40 cm, para lograr así un suministro homogéneo de gas al interior del tubo.

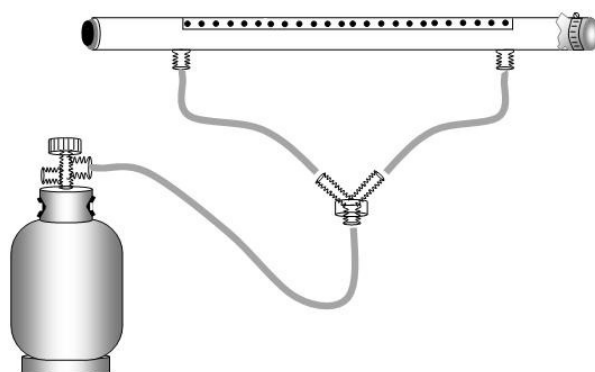


Figura 4: Equipo con suministro lateral de gas

Fundamentos teóricos

Consideremos lo que sucede cuando una onda sonora llega al extremo cerrado de un tubo. En analogía con la onda transversal de una cuerda, ocurre una reflexión y la onda reflejada viaja de regreso por el tubo en dirección opuesta. El comportamiento de la onda en el extremo reflejante depende de si el extremo del tubo es abierto o cerrado.

Si se mantiene una perturbación a frecuencia constante, la superposición de la onda incidente y la reflejada da lugar a un patrón de ondas estacionarias dentro del tubo.

En el caso de un tubo cerrado en un extremo, al viajar la onda por el tubo y llegar a éste, puede comprimir a las capas de aire contra la barrera fija. La presión puede por lo tanto variar aquí con su máxima amplitud, y el extremo cerrado es un antinodo de presión y un nodo de desplazamiento dado que las partículas se ven imposibilitadas a moverse aquí.

Es importante considerar también, que una onda de presión se refleja en un ex-

tremo cerrado sin cambiar de fase, mientras que la onda de desplazamiento sufre un cambio de fase de medio ciclo.

Es posible deducir entonces una función de onda para la onda estacionaria, considerando la superposición de dos ondas iguales que viajan en direcciones opuestas.

Como la onda de desplazamiento reflejada en un extremo cerrado del tubo se invierte se debe anteponer un signo negativo a una de ellas.

La ecuación de la onda incidente en función del tiempo, que viaja en un sentido, por ejemplo, hacia la derecha está dada por la ec. (1). En tanto que la que viaja en sentido opuesto, por la ec. (2).

$$Y_1(x, t) = A \cos(kx - wt) \quad (1)$$

$$Y_2(x, t) = -A \cos(kx + wt) \quad (2)$$

En ambas expresiones A representa la amplitud máxima, k el número de onda, x el desplazamiento longitudinal y w su pulsación angular. El número de onda y la pulsación angular pueden expresarse ma-

temáticamente como se indican en las ecs.(3) y (4) respectivamente. En ellas, la longitud de onda se simboliza con λ y la frecuencia con la cual la situación física varía en cada punto con f

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

$$w = 2\pi.f \quad (4)$$

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas con la velocidad de propagación de la onda mediante la ec. (5).

$$v = \lambda.f \quad (5)$$

La función de onda para la onda estacionaria es la suma de las funciones de onda individuales, las cuales fueron presentadas en las ecs. (1) y (2), y puede expresarse como se indica en la ec. (6).

$$Y(x,t) = Y_1(x,t) + Y_2(x,t) = A[\cos(kx - wt) - \cos(kx + wt)] \quad (6)$$

Usando las identidades para el coseno de la suma y la diferencia de dos ángulos:

$$\cos(a \pm b) = \cos a.\cos b \pm \text{sena}.\text{senb} \quad (7)$$

Se llega a:

$$Y(x,t) = (2A\text{sen}kx)\text{sen}wt \quad (8)$$

La ecuación 8 representa la onda estacionaria en un tubo con un extremo cerrado. Como puede verse, tiene dos factores: uno función del desplazamiento x y otro función del tiempo t . La expresión entre paréntesis indica que para cada instante la forma de la onda es una curva senoidal cuya amplitud depende de la posición.

Es posible utilizar la ec. (8) para determinar la posición de los nodos, es decir los puntos en los que el desplazamiento es nulo para cualquier instante. Y esto ocurre cuando la función seno es nula, es decir, cuando $\text{sen}kx = 0$.

Esta igualdad se tiene siempre que el argumento del seno sea un múltiplo entero de π :

$$kx = 0, \pi, \dots, n\pi \quad \forall n \in N \quad (9)$$

Teniendo en cuenta que k es el número de onda, combinando esta última expresión con la ec. (3), se puede obtener una expresión para la ubicación de los nodos en función de la longitud de onda λ como muestra la ec (11)

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad \forall n \in N \quad (10)$$

Esta última expresión permite inferir que la distancia entre dos nodos consecutivos es de media longitud de onda.

Si bien las deducciones se realizan partiendo de ondas de desplazamiento, las conclusiones son aplicables de igual manera a las ondas de presión, dado que entre las mismas solo existe una diferencia de fase de $\pi/2$.

Implementación de actividades utilizando el equipo en una clase de ondas sonoras

Existe un sinnúmero de actividades que pueden realizarse en el aula con un equipo de estas características; la implementación de unas u otras dependerá en parte de los contenidos que se deseen trabajar y en parte de la creatividad del grupo para concebir nuevas experiencias. A continuación se hace mención de algunas de ellas.

Es importante, ante todo, que al momento de comenzar a utilizar el equipo, se proceda a abrir solo ligeramente el grifo del suministro de gas y dejarlo así por espacio de unos 4 o 5 segundos antes de encender las llamas, de manera que todo el interior del tubo se llene de gas y este alcance una misma presión en toda su extensión.

Pruebas con tonos constantes y determinación de la velocidad del sonido en el gas.

Es interesante aquí, antes de poner en funcionamiento el equipo, motivar a los alumnos a que apliquen la teoría abordada sobre sonido, ondas sonoras y ondas estacionarias para predecir el comportamiento de las llamas cuando se aplique un tono a frecuencia constante en el extremo flexible de equipo. Algunas preguntas disparadoras pueden ser las siguientes:

- ¿Qué sucederá con las llamas cuando el parlante emita un sonido?
- ¿Cómo se comporta el extremo que posee la membrana elástica, cómo se comporta el extremo opuesto?
- ¿Qué sucede con el gas dentro del Tubo?
- ¿Qué ocurrirá cuando cambiemos la frecuencia del sonido?

Las respuestas a estas preguntas pueden ser contrastadas con una prueba empírica enviando al parlante un tono de frecuencia constante.

La onda estacionaria dentro del tubo creará puntos donde las oscilaciones de

presión serán máximas (antinodos de presión) y puntos donde las oscilaciones serán nulas (nodos de presión). En las regiones donde haya oscilaciones de presión debido a la onda estacionaria, más gas se escapará de las perforaciones en el tubo, y las llamas serán más altas en esos puntos. En los nodos de presión las llamas se verán menores.

Esto se traduce en un patrón de llamas de diferentes alturas que describen el contorno de la onda estacionaria existente dentro del tubo. Lo que se observa en realidad es el contorno descrito por el término entre paréntesis de la ecuación (8), las variaciones en el tiempo de la amplitud de las llamas no son perceptibles dado que a frecuencias audibles la rapidez en el cambio de las presiones son tan altas que el gas no alcanza a consumirse y las llamas nunca se apagan, incluso cuando la presión es negativa en ese punto.

A continuación se procede a medir mediante una cinta métrica la distancia entre dos valles consecutivos (que corresponden a dos nodos de presión) o la distancia entre dos máximos (correspondientes a dos antinodos de presión).

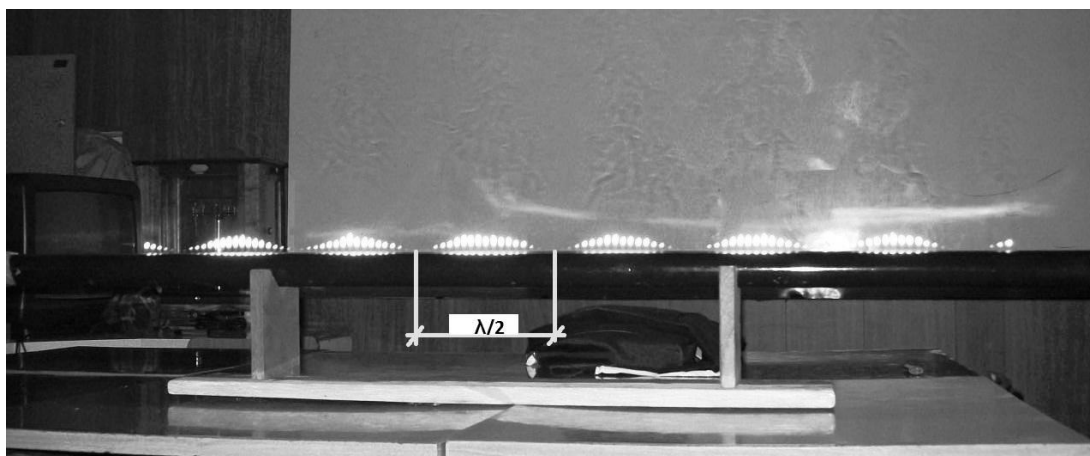


Figura 5: equipo funcionando con un tono de frecuencia constante.

En base a la ecuación (11), se sabe que dicha distancia es media longitud de onda, por lo que será posible entonces obtener λ para luego hallar la velocidad del sonido en el interior del tubo mediante la relación:

$$v = \lambda \cdot f \quad (5)$$

El valor obtenido para la velocidad puede finalmente contrastarse con los valores tabulados existentes a fin de validarlos.

El tono puede ser generado con el software "Audacity", de distribución gratuita, y reproducido en el mismo programa o guardado en formato wav mediante la opción exportar, para luego ser reproducido con cualquier reproductor digital, incluso teléfonos celulares. Audacity puede ser descargado de su página oficial: <http://audacity.sourceforge.net/>; una vez instalado no requiere conexión a Internet para su funcionamiento, además este software se encuentra incluido en las netbooks del programa Conectar Igualdad distribuidas en todo el territorio argentino.

Frecuencia de resonancia y modos normales.

Todo objeto hecho de un material elástico vibra cuando es perturbado, y lo hace con sus frecuencias naturales propias, que en conjunto producen un sonido especial. Se habla entonces de la frecuencia natural del objeto, la cual depende de factores tales como la elasticidad y la forma del mismo. Sin embargo, una perturbación externa puede obligar al cuerpo a vibrar en cualquier frecuencia, no necesariamente a su frecuencia natural. Se produce entonces lo que se conoce como *vibración forzada*.

Tal es el caso del gas que vibra dentro del tubo por efecto de las vibraciones del parlante; aquí la frecuencia de las oscilaciones producidas en él vienen dadas en parte por la fuerza externa y no tan solo por la frecuencia natural del tubo. La respuesta del sistema dependerá de la rela-

ción entre la frecuencia externa aplicada y la natural de dicho sistema. Si se elige una frecuencia para el tono enviado a través del parlante que coincida con uno de los modos normales del tubo, las amplitudes de la onda estacionaria resultante serán mayores, ya que el tubo *entrará en resonancia*, y por lo tanto se producirán llamas superiores que para otras frecuencias, para una misma intensidad de sonido.

Se considera al Tubo de Rubens como un tubo semiabierto, ya que el extremo por donde ingresa el gas se comporta como un extremo cerrado mientras que el extremo con la membrana elástica se comporta como un extremo abierto pues la membrana acompaña el movimiento del parlante. La elección de la frecuencia f_n para que el tubo entre en resonancia dependerá de la longitud l del tubo según la ecuación (12):

$$f_n = \frac{v(2n+1)}{4l}$$

con $n=0, 1, 2$ (*Tubo semiabierto*)

Se podrá así establecer los valores de una familia de frecuencias de resonancia para el Tubo a fin de emitirlos por el altavoz y observar dicho fenómeno. Por otro lado, la ecuación (12) también nos permitiría, en caso de conocer el valor de la velocidad de la propagación en el gas con antelación, construir un Tubo de longitud adecuada para que el equipo entre en resonancia a una familia de frecuencias deseada.

Una experiencia alternativa a esta que permite trabajar el software mencionado arriba, también referida al concepto de frecuencia de resonancia pero desde un punto de vista menos matemático y más conceptual, es emitir una *barrido de frecuencias* a través del altavoz, desde valores cercanos a los 80 Hz hasta los 1000 Hz aproximadamente, lo que permitirá una muy clara visualización de la existencia de

los modos normales, los que se pondrán en evidencia cada vez que la frecuencia emitida coincida con una de las naturales del Tubo.

Ensayo con pistas musicales.

Otra experiencia que resulta muy interesante consiste en hacer funcionar al equipo con pistas musicales, especialmente aquellas en las que predomine un solo instrumento como un piano o una flauta, ya que canciones en las que existan superposiciones de varios instrumentos generan patrones distorsionados.

Esta práctica puede implementarse en una clase como estrategia disparadora para asociar la teoría de ondas sonoras con el funcionamiento de algunos instrumentos musicales como los de viento o instrumentos de cuerda. En este caso, a modo de disparador, podría indagarse qué relación existe entre el funcionamiento de una flauta o una guitarra y el fenómeno de ondas estacionarias.

Síntesis final

El Tubo de Rubens es un equipo que llama la atención en cualquier ámbito con el solo hecho de encontrarse en funcionamiento.

No obstante su bajo costo de construcción y su elaboración relativamente sencilla, lo convierten en un dispositivo que resulta muy útil a fines educativos, ya que permite visualizar alteraciones en el medio que de ordinario no pueden percibirse a través de los sentidos; por ello, este dispositivo se constituye en una potente herramienta didáctica a tener en cuenta a la hora de abordar el desarrollo de una gran variedad de cuestiones relacionadas a las ondas mecánicas.

Referencias

- Beranek, L. L. (1969). *Acústica*. Buenos Aires: Editorial Hispanoamericana. Segunda Edición.
- Sears, F. M.; Zemansky, M.W.; Young, H.D.; Freedman, R.A. (2009). *Física Universitaria*, Vol. 1, México D. F.: Pearson Educación. Decimosegunda Edición
- Wilhelm, H.W. (1958). *Prácticas de Física*, Barcelona: Editorial Labor. Cuarta Edición.
- Ministerio de Cultura, Educación, Ciencia y Tecnología. Provincia de Misiones. MCECyTM (2012), Diseño Curricular Jurisdiccional. Ciclo Orientado. Tomo II. Documento preliminar sujeto a modificaciones. Versión *on line* disponible en: <http://dcjmisiones.blogspot.com.ar/>
http://en.wikipedia.org/wiki/Rubens%27_tube
<http://www.slideshare.net/julianys/librocap1>