



Rapidez de propagación de una onda sonora en un gas

Anaya Jiménez Andrea Denny, Castro Chavelas Niurka Chaveli, Contreras Martínez Gustavo*,
Alfaro Fuentes Ricardo, Hernández Marín Elizabeth.

Facultad de Química. Av. Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México. C. U. Del. Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, CiMéxico.

*Autor para correspondencia: gus-contreras7090@hotmail.com

Recibido:

20/septiembre/2019

Aceptado:

04/noviembre/2019

Palabras clave:

Onda estacionaria, onda sonora, propagación sonido, gas

Keywords:

Standing wave, sound wave, sound propagation, gas

RESUMEN

El Tubo de Rubens es un aparato que permite visualizar una onda estacionaria. El objetivo de esta investigación fue determinar la rapidez de propagación de una onda sonora en dos gases diferentes: propano y gas LP, en un Tubo de Rubens. Se variaron las frecuencias de una onda sonora para encontrar los distintos armónicos y determinar su longitud de onda. Se graficaron las frecuencias contra los inversos de la longitud de onda y así se determinó la rapidez de propagación de la onda en cada gas. Se obtuvo que la velocidad en el propano fue de (259 ± 5) m/s y en el gas LP (260 ± 6) m/s. Este experimento fue efectivo para demostrar la aparición de los nodos y antinodos en una onda estacionaria. Para futuras investigaciones, se propone el estudio del efecto de algunas variables como la presión en el tubo.

ABSTRACT

The Rubens' Tube is a device that allows the visualization of a standing wave. The objective of this investigation was to determine the propagation speed of a sound wave for two different gases: propane and LP gas in a Rubens' tube. The frequency of the sound wave was varied in order to find the different harmonics determine its wavelength. The frequencies were plotted against the inverse of the wavelength, thus obtaining the propagation speed for each gas. It was obtained that the propagation speed of sound for propane was (259 ± 5) m/s, and for LP gas (260 ± 6) m/s. This experiment was effective to demonstrate the appearance of nodes and antinodes in a standing wave. For future work, it is proposed the study of the effect of variables such as the pressure inside the tube.

Introducción

La combinación (superposición) de una onda incidente y su reflejo puede llegar a formar una onda estacionaria. Dichas ondas se distinguen de las ondas viajeras porque en las primeras el patrón de la onda permanece en la misma posición (Young y Freedman, 2009). Una onda estacionaria contiene nodos y antinodos y sólo ocurre en ciertas frecuencias de la onda que dependen de la naturaleza del sistema donde la onda se propaga. Es posible obtener una serie de ondas estacionarias, cada una con frecuencia diferente; la frecuencia más pequeña es la frecuencia fundamental y las otras frecuencias de onda estacionaria son múltiplos de la fundamental y se llaman armónicos.

El Tubo de Rubens es un experimento creado en 1905 por Heinrich Rubens y Otto Krigar-Menzel, en la búsqueda de una herramienta para visualizar una onda estacionaria. El sistema consistió en un tubo de latón de 4 m de largo y 8 cm de diámetro, que fue perforado a lo largo de la parte superior con orificios de 2mm de diámetro. El tubo era cerrado con un extremo conectado a un tanque de "coal gas" (mezcla de hidrógeno, metano, monóxido de carbono y etileno) y el otro extremo, conectado a un diapason en una caja. El tubo fue llenado con el gas, el cual salía por los orificios de la superficie. Este gas liberado se encendió y permitió observar la llama modificada según la resonancia del diapason. (Rubens y Krigar -Menzel, 1905).

Empleando el mismo sistema los científicos alemanes Ficken y Stephenson evaluaron los cambios de la amplitud de la flama demostrando la variación de esta amplitud a distintas frecuencias; los cambios encontrados se les conoce con el nombre de nodos y antinodos (Ficken y Stephenson., 1979). Por otra parte, se conoce que el extremo del tubo cerrado es un antinodo de presión que, en la analogía de una onda transversal en una cuerda, es un nodo de desplazamiento, porque en ese punto las partículas no pueden moverse. Así mismo, cuando existe un antinodo de desplazamiento se crea un nodo de presión. (Prandi y Wurm., 2012).

Para conocer la longitud de una onda, λ , se utiliza la distancia, d , que hay entre dos nodos o antinodos de la onda y se multiplica por dos:

$$\lambda = 2d \quad (1)$$

La rapidez de propagación de la onda, v , se puede obtener como el producto de la frecuencia, f , y la longitud de onda:

$$v = \lambda f \quad (2)$$

En los laboratorios de física de la Facultad de Química de la UNAM se construyó un prototipo de Tubo de Rubens

con el fin de estudiar la rapidez de propagación de una onda sonora a través de dos gases: propano y gas LP.

En un gas, la rapidez de propagación de una onda sonora depende tanto de la temperatura, T , como de la masa molar, M , del gas a través de la siguiente expresión (Atkins, 2010):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3)$$

donde γ es el coeficiente adiabático del gas y R es la constante universal de los gases ideales. Por lo tanto, a una misma temperatura, es de esperar que a menores masas mayores velocidades. Es por esto que se esperaba que el sonido tenga una rapidez de propagación mayor en el propano con respecto al gas LP.

Metodología

En la figura 1 se presenta el diagrama del experimento realizado. Se creó un Tubo de Rubens con un tubo de acero galvanizado de 1.50 m de largo y con un diámetro de 10.16 cm (4 pulgadas). En un extremo se colocó un reductor de 4 a 1/4 de pulgada para conectar con una manguera un flujo del gas a ser empleado. En el extremo opuesto se colocó una membrana elástica (látex) con una bocina conectada a un amplificador (Power Amplifier Accessory Speaker y Power Amplifier, ambos marcan Vernier). A lo largo del tubo se realizaron orificios con una broca de 0.16 mm con 1 cm de separación entre cada separación entre cada orificio.

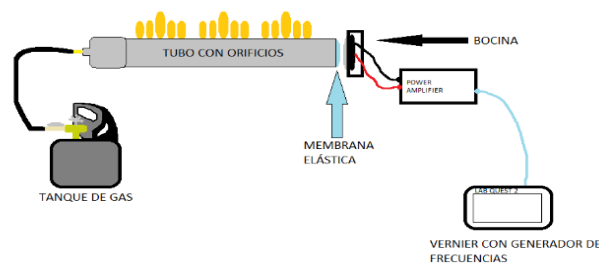


Figura 1. Diagrama del prototipo del Tubo de Rubens utilizado.

Se considera a este sistema como un tubo cerrado-cerrado. Al hacer incidir una onda sonora, esta viaja a lo largo del tubo y se refleja al llegar al extremo opuesto. Con esto se tienen dos ondas viajeras dentro del tubo: la onda incidente y la onda reflejada. Éstas crean una superposición y para ciertas frecuencias se obtiene una onda estacionaria o armónico.

La onda estacionaria se visualiza al encender el gas que sale por los orificios del tubo; al ir variando la frecuencia, se puede apreciar que, a ciertos valores, aparece un patrón donde la flama llega a una altura máxima en ciertos puntos (en este trabajo serán denominados como antinodos) mientras que en otros la flama es mínima sino

es que nula (nodos). En la figura 2 se muestran algunos ejemplos de los armónicos obtenidos a lo largo de la experimentación.

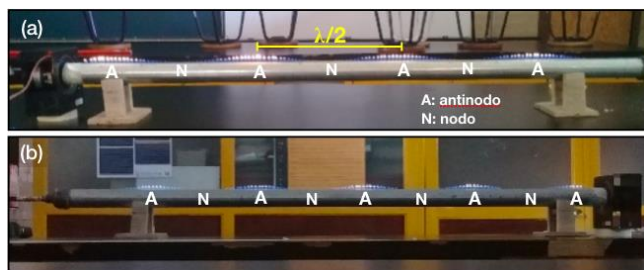


Figura 2. Prototipo de Tubo de Rubens construido en el laboratorio. (a) Identificación del cuarto armónico. (b) Quinto armónico. La distancia entre dos nodos sucesivos es igual a $\lambda/2$. "A" se refiere a los antinodos y "N", a los nodos de las ondas estacionarias generadas a ciertas frecuencias.

Las frecuencias de las ondas sonoras fueron generadas con la aplicación de generador de frecuencias incluido en la interface 'Vernier LabQuest' (modelo LQ2-LE) empleando el amplificador y la bocina ya mencionados.

Una vez localizado un armónico, se empleó un flexómetro (Trupper, 3m, resolución 0.001 m) para medir la distancia entre dos antinodos sucesivos. La longitud de la onda sonora que viaja en el gas se determinó con la ecuación 1.

Adicionalmente, cada vez que se localizaba un armónico, se midió la temperatura en la superficie del tubo en los extremos y en el centro. Se empleó un termómetro infrarrojo digital marca Steren (modelo HER-427).

En cada caso, se localizaron de 7 a 8 armónicos y el procedimiento se repitió tres veces por cada gas (propano y gas LP).

La rapidez de propagación de la onda sonora se determinó a partir de una gráfica de la frecuencia como función del inverso de la longitud de onda. Despejando la frecuencia de la ecuación 2 se encuentra que

$$f = v \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

Por lo tanto, la pendiente de la recta ajustada en una gráfica de la f vs. $1/\lambda$ representa la rapidez de propagación de la onda sonora en el gas.

Resultados y discusión

Rapidez de propagación teórica

Como se ha indicado, la rapidez de propagación de una onda sonora en un gas depende de la masa molar y de la temperatura. Se trabajó con dos gases diferentes, el gas propano con una masa molar de 44.1 g/mol y gas LP

comercial que es una mezcla de gas propano-butano (60-40% de volumen) (PEMEX, 2018).

Tomando como base una temperatura de 49°C (322.15 K) y de acuerdo a la ecuación 3, la rapidez teórica de propagación del sonido en propano es:

$$v_{\text{propano}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

$$= \sqrt{\frac{(1.1264) \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}\right) (322.15\text{K})}{0.0441 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}}$$

$$= 262 \text{ m/s}$$

El coeficiente adiabático relaciona la capacidad calorífica a volumen constante del gas (C_v) y la capacidad calorífica a presión constante (C_p) de acuerdo a la expresión $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Para el propano, $C_v = 1.4909 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ y $C_p = 1.6794 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, y para el butano, $C_v = 1.5734 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ y $C_p = 1.7164 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ (Bárceñas, 2009)

Para calcular la rapidez de propagación del sonido en gas LP, fue necesario realizar cálculos adicionales para obtener tanto la masa molar como el coeficiente adiabático de la mezcla.

La masa molar del gas LP se obtiene como sigue:

$$M_{\text{gasLP}} = (0.6)44.1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + (0.4)58.12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 49.7 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

El cálculo de la C_p del gas LP se presenta a continuación:

$$C_p = \frac{0.6M_{\text{propano}}}{M_{\text{gasLP}}} (C_{pC_3H_8}) + \frac{0.4M_{\text{butano}}}{M_{\text{gasLP}}} (C_{pC_4H_{10}})$$

$$= \frac{(0.6)44.1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{49.7 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \left(1.6794 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)$$

$$+ \frac{(0.4)58.12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{49.7 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \left(1.7164 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)$$

$$= 1.70 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Del mismo modo, la C_v del se obtiene como:

$$\frac{(0.6)44.1}{49.7} \left(1.4909 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) + \frac{(0.4)58.12}{49.7} \left(1.5734 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) =$$

$$1.53 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Así, el coeficiente adiabático de la mezcla es:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1.70 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}}{1.53 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 1.11$$

Finalmente, se encuentra la rapidez de propagación en el gas LP a 49°C:

$$v_{gasLP} = \sqrt{\frac{(1.11) \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}\right) (322.15 \text{ K})}{0.0497 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}} = 244.5 \text{ m/s}$$

El análisis teórico, basado en una expresión válida para un gas ideal, indica que el sonido se propaga más rápido en el propano que en el gas LP siempre y cuando se compare el mismo valor de temperatura.

Rapidez de propagación experimental de una onda sonora en gas propano

Las temperaturas medidas durante los experimentos con gas propano abarcaron el intervalo de (46.9°C a 61.9°C).

Se encontraron todos los armónicos posibles en un rango de frecuencias de 100 a 1000 Hz. En la Tabla 1 se presentan los resultados promedio obtenidos al considerar las tres repeticiones del experimento. Se puede notar que se encontraron 8 armónicos que van del segundo al noveno. Fuera del intervalo de 100 a 1000 Hz no fue posible identificar ningún armónico. La frecuencia más alta registrada en las tres corridas fue de 850 Hz mientras que la frecuencia más baja de fue 245 Hz.

Tabla 1. Frecuencias promedio, f , y distancias promedio entre antinodos sucesivos, d , para cada armónico (Arm) con gas propano. Se incluye también la longitud de onda, λ , su inverso y las temperaturas registradas. Gas propano.

Arm	f (Hz)	d (m)	λ (m)	Temperaturas (°C)	$1/\lambda$ (m ⁻¹)
2	257±6	0.677 ± 0.013	1.354 ± 0.026	46.90	0.739 ± 0.014
3	335±4	0.481 ± 0.002	0.961 ± 0.005	53.13	1.040 ± 0.005
4	417±1	0.356 ± 0.006	0.712 ± 0.011	49.76	1.40 ± 0.02
5	503±9	0.290 ± 0.002	0.581 ± 0.003	52.56	1.72 ± 0.01
6	593±10	0.243 ± 0.002	0.487 ± 0.005	53.93	2.05 ± 0.02
7	665±6	0.210 ± 0.001	0.420 ± 0.002	53.33	2.381 ± 0.013
8	755±9	0.185 ± 0.001	0.369 ± 0.002	54-76	2.708 ± 0.015
9	846±2	0.168 ± 0.005	0.337 ± 0.010	61.90	2.97 ± 0.09

En línea con la ecuación 4, la Figura 3 presenta la gráfica de las frecuencias promedio de cada armónico localizado contra sus respectivos inversos de longitud de onda. El cálculo por cuadrados mínimos de los datos obtenidos experimentalmente y que se observan en la gráfica de la

figura 3 indican que la rapidez de propagación de una onda sonora en el propano es de 259 m/s ± 5 m/s, que corresponde por completo con el valor convencional obtenido de 262 m/s.

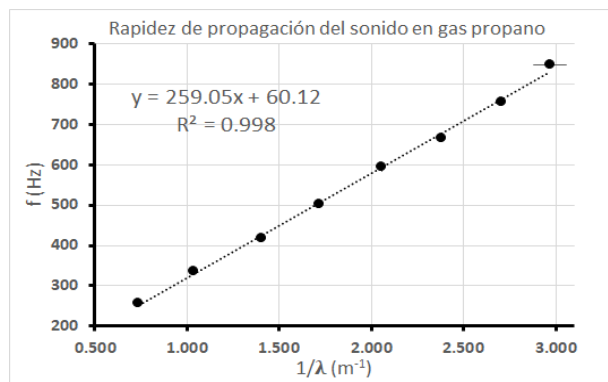


Figura 3. Gráfica de frecuencias de cada armónico contra inverso de longitud de onda para la determinación de la rapidez de propagación de las ondas sonoras en gas propano.

Rapidez de propagación experimental de una onda sonora en gas LP

Se debe hacer notar que en el caso del gas LP se registraron temperaturas más altas que las anotadas para el gas propano. Entonces, las temperaturas medidas durante los experimentos con gas LP abarcaron el intervalo (47.65°C a 71.20°C). esto tiene sentido ya que el gas LP contiene cierto porcentaje de gas butano, el cual tiene una mayor capacidad calorífica que el propano.

En los experimentos con gas LP se encontraron 7 armónicos que abarca del segundo al octavo armónico. La frecuencia más alta y la más baja de las tres corridas para este gas fueron de 803 Hz y 278 Hz, respectivamente. En la Tabla 2 se presentan los resultados promedio para cada armónico.

Tabla 2. Frecuencias promedio, f , de cada armónico (Arm); distancia promedio entre antinodos sucesivos, d ; longitud de onda, λ , su inverso y las temperaturas registradas. Gas LP.

Arm	f (Hz)	d (m)	λ (m)	Temperaturas (°C)	$1/\lambda$ (m ⁻¹)
2	245±3	0.667 ± 0.023	1.334 ± 0.045	47.65	0.75 ± 0.03
3	363±5	0.458 ± 0.004	0.915 ± 0.008	57.64	1.09 ± 0.01
4	433±5	0.359 ± 0.004	0.717 ± 0.008	58.70	1.39 ± 0.02
5	520±7	0.292 ± 0.002	0.583 ± 0.004	65.12	1.71 ± 0.01
6	604±12	0.240 ± 0.003	0.479 ± 0.006	67.84	2.05 ± 0.02
7	704±12	0.212 ± 0.001	0.423 ± 0.002	70.59	2.36 ± 0.03
8	789±7	0.185 ± 0.001	0.369 ± 0.002	71.20	2.71 ± 0.02

Al igual que con el propano, la figura 4 presenta la gráfica de frecuencias promedio de cada armónico como función del inverso de la longitud de onda. Se observa que la rapidez de propagación para una onda sonora en esta mezcla de gas propano y butano es de 260 m/s \pm 6 m/s.

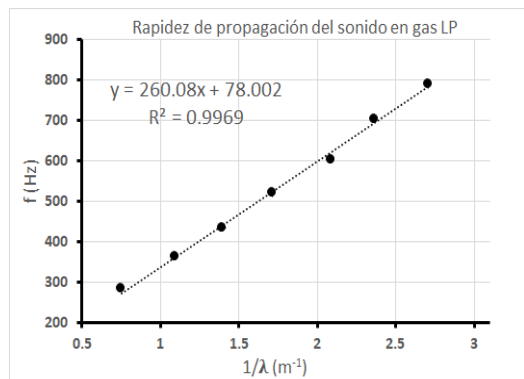


Figura 4. Gráfica de frecuencias promedio de cada armónico contra inverso de longitud de onda para la determinación de la velocidad de propagación del sonido en gas LP.

En la Tabla 3 se presentan un resumen de los resultados presentados anteriormente para la determinación de la rapidez de propagación de una onda sonora en gas propano y en gas LP.

Tabla 3. Rapidez de propagación teórica y experimental de una onda sonora en propano y gas LP.

Gas	Valor de referencia ¹	Valor experimental ²
Propano	262 m/s	(259 \pm 5) m/s
Gas LP (60% propano, 40% butano)	245 m/s	(260 \pm 6) m/s

Notas: ¹El valor de referencia se calculó a 49°C. ²La temperatura fue variando en un intervalo de intervalo (47.65 °C a 71.20°C). a lo largo de la realización de los experimentos.

Examinando las incertidumbres asociadas a los resultados experimentales de la Tabla 3, la rapidez de propagación en el gas propano y en el gas LP resultó ser esencialmente la misma. Comparando los resultados obtenidos tanto experimental como teóricamente, se tiene que para el gas propano el porcentaje de error es del 1.1%, mientras que para el gas LP se tiene un 6.1% de error.

Siendo así, el prototipo construido permite obtener una muy buena aproximación del valor de la rapidez de propagación de una onda sonora en un gas. Hay que recordar que la velocidad de propagación del sonido en el aire es de 340 m/s a 20°C y aproximadamente 360 m/s a 49°C, por lo que los resultados obtenidos indican que es factible determinar la rapidez de propagación del sonido en gases diferentes al aire, con un porcentaje de error aceptable.

El sistema experimental con su configuración actual no permite la medición de la temperatura dentro del tubo y conforme avanza el experimento la temperatura de este aumenta. Se midió la temperatura en la superficie del tubo obteniendo valores mayores en el centro del tubo, con respecto a los extremos.

Ahora, si se emplea la ecuación 3 para calcular la rapidez de propagación a una temperatura de 70°C se encuentran valores de 270 m/s y de 252 m/s para gas propano y gas LP, respectivamente. Se utilizan estos valores como referencia, el error aumentaría a 3% para el propano y disminuiría para el gas LP. Es decir, si se quiere obtener una mejor estimación del valor de referencia es importante determinar la temperatura de trabajo dentro del tubo y no sólo en su superficie. Por otro lado, se ha reportado que la composición de la mezcla del gas LP puede variar. Por ejemplo, el Centro de Investigación para el desarrollo, A. C. indica que la mezcla más usada en México puede llegar a tener hasta un 80% de gas propano. (CIDAC, 2015). Consecuentemente, no se puede descartar la posibilidad de que la mezcla de gas LP empelada en la condición del experimento contenga mucho más del 60% de gas propano.

Se sabe que las ondas se propagan en un medio con rapidez constante (siempre y cuando no cambien las condiciones, por ejemplo, de temperatura). Una ventaja adicional que se encontró en el uso del dispositivo experimental es que a pesar de que no es posible mantener una temperatura constante a lo largo del experimento se puede mostrar que, para que la relación de la ecuación 2 se cumpla cuando la rapidez es constante, al aumentar la frecuencia de la onda, la longitud de onda debe disminuir necesariamente. Esto queda comprobado al observar los resultados de las tablas 1 y 2.

Otros factores que no fueron considerados en la determinación del valor de referencia son: el tamaño de los orificios y la presión con la que el gas sale del tanque.

Conclusiones

El Tubo de Rubens construido en el laboratorio permitió observar de una manera muy clara el comportamiento de una onda sonora estacionaria dentro de un tubo lleno de un gas diferente al aire, dado que fueron identificados del segundo al séptimo o al octavo armónico a través del patrón generado por las flamas a ciertas frecuencias.

De acuerdo a la teoría para un gas ideal, la rapidez de propagación del sonido en la mezcla del gas LP es menor en comparación con el gas propano porque el gas LP tiene una masa molecular mayor con respecto al propano.

Sin embargo, los resultados experimentales indican que la rapidez de propagación de una onda sonora en el gas LP (mezcla de butano/propano) tiene el mismo valor que para el gas propano (260 ± 6 m/s y 259 ± 5 m/s, respectivamente).

Con futuros ajustes en el diseño experimental, se podría expandir la investigación para este experimento. Por ejemplo, una mejor determinación de la temperatura dentro del tubo es importante. Se propone también medir la presión en el tubo para estudiar su efecto en los resultados obtenidos. Adicionalmente, el uso de un tubo de un material distinto pero que de igual manera resista altas y continuas temperaturas permitiría determinar si se presenta un contra-efecto en las frecuencias de resonancia. De igual forma, queda abierta la posibilidad de analizar si hay alguna relación entre el largo del tubo, el número de orificios y la separación entre ellos para la determinación de las frecuencias de resonancia y la longitud de onda respectiva.

Agradecimientos

Se agradecen las facilidades prestadas por los laboratorios de Física de la FQ-UNAM para la realización de los experimentos posteriores a la realización de la Muestra Experimental.

Referencias

Atkins P., De Paula J. (2010). Physical Chemistry. 9ª Ed. W. H. Freeman and Company, 90

Bárceñas M. (2009). Tabla de gases ideales. Recuperado el 01 de junio de 2019, de <https://sites.google.com/site/prinftermo/Home/primera-ley/tablagases>

CIDAC (2015). Es posible desarrollar un mercado de gas L.P. competitivo en México. [PDF]. Recuperado de <http://cidac.org/wp-content/uploads/2015/08/EsPosible-gas-lp-ago7.pdf>

Ficken G., Stephenson C. (1979). Rubens flame-tube demonstration, *Phys. Teach.*, 17:306-310.

PEMEX (2018). Hoja de datos de seguridad. Gas Licuado del Petróleo [PDF]. Recuperado de <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/>

HDS/gas/HDS%20SAC%20%20Gas%20licuado%20del%20petróleo%20TRI-11%20v1.1.pdf

Prandi F., Wurm G. (2012) Equipamiento de laboratorio de bajo costo: "Tubo de Rubens". *Revista de Enseñanza de la Física.*, 25:79-87.

Rubens H., Krigar-Menzel, O. (1905), Flammenröhre für akustische Beobachtungen (Flame tube for acoustical observations), *Ann. Phys.*, 17, 149-164.

Young, H.D., Freedman, R. A. (2009). Física universitaria volumen 1. 12ª Ed. Pearson Educación, 508.