

Medida de la temperatura con una botella



Jesús Alba Fernández, Romina del Rey Tormos

Escuela Politécnica Superior de Gandía
Universidad Politécnica de Valencia
jesalba@fis.upv.es; roderey@doctor.upv.es

PACS: 43.10; 01.50 Pa

Este artículo ha obtenido el premio de la Real Sociedad Española de Física-Fundación BBVA, al mejor artículo de Enseñanza, Notas Históricas o Ensayos, ha sido publicado en la Revista Española de Física y cedido amablemente por la Real Sociedad Española de Física.

Resumen

El objeto de este trabajo es la determinación experimental de la temperatura utilizando como único medio una botella. La botella es un resonador de Helmholtz, que es el sistema acústico más sencillo. Su comportamiento depende directamente de la velocidad de propagación del sonido en el aire y ésta, a su vez, de la temperatura. Se proponen dos procedimientos diferentes que permiten obtener la temperatura de forma sencilla.

Abstract

The purpose of this paper is the experimental determination of temperature using a bottle as the only means. The bottle is a resonator of Helmholtz, which is the acoustic simpler system. Its behavior depends directly on the speed of propagation of the sound in the air and. This speed depends on temperature. In this paper are proposed two different procedures to determine the temperature easily.

1 Introducción

Una botella suele comportarse como un resonador de Helmholtz, es decir, como un elemento básico de la acústica física que tiene un comportamiento análogo a un circuito RLC serie [1,2]. En ella se puede definir una masa acústica, análoga a una autoinducción, una compliancia acústica, análoga a un condensador, y una resistencia de pérdidas. Un resonador de Helmholtz [1,2] puede utilizarse para medir de forma indirecta la velocidad del sonido en el aire [3], o para evaluar el volumen de líquido contenido en una botella [4]. En resumen, un resonador de Helmholtz es un sistema acústico que presenta una frecuencia de resonancia en la cual absorbe la máxima energía.

La frecuencia de resonancia de la botella (considerada como un oscilador de Helmholtz) depende, en primera aproximación, de sus dimensiones y de la velocidad de propagación del sonido en el aire que contiene [1,2,3].

Los cambios de temperatura producen variaciones en la velocidad de propagación del sonido en el aire, lo que modificará la frecuencia de resonancia de la botella. Es por ello posible [5], si registramos esos cambios de frecuencia para una botella bien caracterizada, obtener la temperatura. La botella funcionaría, por tanto, como un termómetro secundario.

La gran mayoría de los termómetros que se utilizan en la práctica son termómetros secundarios. Es decir, lo que se mide directamente no es la temperatura, sino una cierta propiedad termométrica que depende, a su vez, de la temperatura. Algunos ejemplos de propiedades termométricas son: el volumen de un líquido en un capilar, la longitud de una varilla, la resistencia eléctrica, la fuerza electromotriz, el volumen de un gas a presión constante, la presión de un gas a volumen constante, etc. Existen termómetros primarios, basados en fenómenos cuánticos, que permiten una medida directa de la temperatura.

2 El resonador de Helmholtz y la temperatura

Un resonador de Helmholtz, consiste en una cavidad rígida de volumen V con un cuello de área transversal S , radio r y longitud l (figura 1). Como ya se ha indicado en trabajos anteriores, este elemento puede ser tan simple como una botella de cualquier tamaño [3]. Cuando se excita adecuadamente el aire contenido en el cuello de la botella, consiguiendo la oscilación de éste, se comporta como una masa en movimiento. El volumen de la botella actúa como un muelle, con lo cual ambos elementos constituyen un sistema masa-muelle. Las condiciones necesarias se analizan más en detalle en las referencias [1,2].

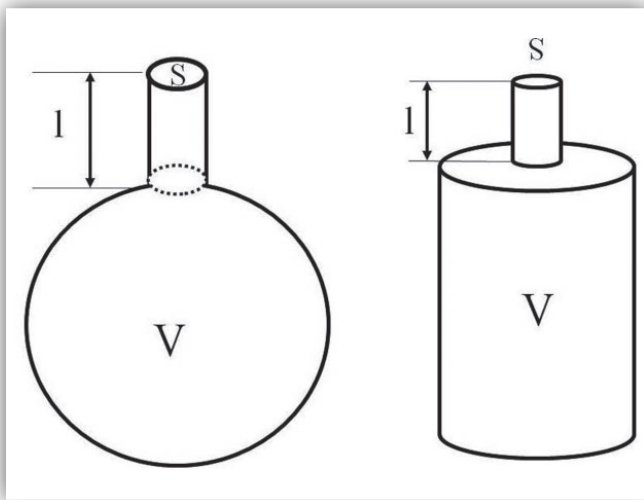


Figura 1. Ejemplos de Resonadores de Helmholtz simples.

Como en cualquier sistema masa-muelle, se puede obtener una resonancia en condiciones adecuadas. En nuestro caso particular, la frecuencia angular de resonancia viene dada por [3]:

$$\omega_0 = c_0 = \sqrt{\frac{S}{l'V}}$$

siendo c_0 la velocidad de propagación del sonido en el aire, V el volumen de la cavidad, S la superficie transversal del tubo abierto, y l' es la longitud del tubo abierto (a la que hay que añadir la corrección de orificio, porque el aire en movimiento no sólo es el contenido dentro del tubo sino que se ha de considerar también parte de los alrededores). El valor de l' , en el caso de que no exista ningún tipo de pestaña a la salida del resonador, es [2,3]:

$$l' = l + \frac{16R}{3\pi}$$

donde R es el radio de la superficie transversal S . De la relación anterior se puede obtener la frecuencia de resonancia, f_0 :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = c_0 \frac{\sqrt{S}}{2\pi} = c_0 K_{bot} \quad (1)$$

Por tanto, la frecuencia de resonancia es proporcional a la velocidad de propagación del sonido en el aire y a un término, K_{bot} (unidades de longitud⁻¹) que depende sólo de las dimensiones del resonador:

$$K_{bot} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l'V}}$$

Para una misma botella, si despreciamos en primera instancia los efectos de dilatación térmica, K_{bot} será una constante. Los cambios en la frecuencia de resonancia vendrán dados únicamente por cambios en la velocidad de propagación del sonido en el aire.

Como es bien conocido, la velocidad de propagación del sonido en el aire depende de la temperatura. Una expresión fenomenológica [5], válida para temperaturas próximas al ambiente, es:

$$c_0 = 331,4 + 0,607T_0$$

Donde cuando se substituye por T_0 la temperatura en grados centígrados, resulta la velocidad del sonido c_0 en m s⁻¹. Por tanto, un aumento de temperatura, produce un aumento de la velocidad de propagación del sonido en el aire y un incremento de la frecuencia de resonancia de la botella. Combinando con la Ec. (1), obtenemos:

$$T_0 = \frac{f_0 - 331,4K_{bot}}{0,607K_{bot}} \quad (2)$$

De este modo, conocida la frecuencia de resonancia, se puede obtener, bajo ciertas limitaciones, la temperatura.

3 Metodos propuestos para determinar la temperatura

Para determinar la temperatura se pueden seguir dos caminos diferentes: absoluto o relativo (calibración). Para una medida absoluta hay que determinar muy bien las dimensiones de la botella, para obtener el valor de K_{bot} con la menor incertidumbre posible. Este valor, junto con la medición de la frecuencia de resonancia, f_0 , nos permitiría obtener la temperatura a través de la Ec. (2). Si suponemos constante y sin incertidumbre el término K_{bot} , es fácil obtener una relación entre el error relativo de la temperatura y el error con el que se mide la frecuencia de resonancia:

$$\frac{\Delta T_0}{T_0} = \frac{1}{0,607K_{bot}} \quad (3)$$

Analizando la expresión anterior, para disminuir el error asociado a la determinación de la temperatura, es conveniente que K_{bot} sea lo más grande posible. Para

ello, S (la boca de la botella) debe ser lo más grande posible, V (el volumen de la botella), lo más pequeño posible y l (el cuello de la botella), lo más corto posible. Por ejemplo, una botella de vino de $\frac{3}{4}$ de litro de volumen, un radio de boca de 1 cm y una longitud de cuello de 7 cm [3], produciría un error mayor que se obtendría al escoger una botella más pequeña, como es el caso de este trabajo. En el caso de este trabajo se ha decidido escoger una botella de las usadas para almacenar pequeñas esencias de perfume, con un volumen de 12 ml, una longitud de cuello aproximado de 8.5 mm y un radio de boca aproximado de 6 mm (figura 2).

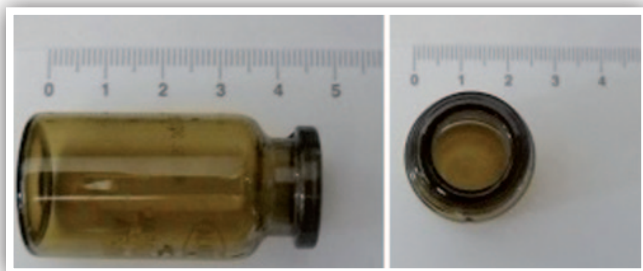


Figura 2. Botella utilizada.

La segunda opción es utilizar una botella «patrón» de la que se conozca la temperatura de referencia T_0 y la frecuencia de resonancia asociada, f_0 . Si se utilizan botellas iguales, la nueva frecuencia de resonancia f_1 será debida a la nueva temperatura T_1 . Se puede obtener una expresión para este caso, que no depende de las dimensiones de la botella:

$$T_1 = (546,0 + T_0) \frac{f_1}{f_0} - 546,0 \quad (4)$$

Si sólo tenemos en cuenta el error relativo al determinar f_1 se puede obtener el error relativo al determinar la temperatura T_1 :

$$\frac{\Delta T_1}{T_1} = \frac{1}{f_0} (546,0 + T_0) \frac{\Delta f_1}{f_1}$$

En el caso de la botella elegida, para una T_0 de 0 °C, la frecuencia de resonancia asociada es de 1 185,8 Hz. El error relativo al determinar T_1 es 0,46 veces el de f_1 . Con este segundo método no es necesario medir las dimensiones, aunque éstas sí influyen en que cambie más rápidamente la frecuencia de resonancia con la temperatura.

4 Medidas realizadas

En este caso la medida de la frecuencia de resonancia se puede realizar de muchas formas. Para este trabajo se ha decidido, por sencillez, grabar directamente con el micrófono incorporado en un ordenador portátil so-

plando en la botella, con una frecuencia de muestreo de 44 100 Hz y 16 bit, en estéreo y con la precaución de que no saturé, aunque se podría hacer directamente con un osciloscopio como en otros trabajos [3,4].

Con un programa de edición de audio de mediana calidad se puede obtener el periodo de la señal, y a partir de ahí la pulsación de resonancia y la frecuencia de resonancia. Algunos programas de sonido ya permiten obtener el análisis frecuencial, que nos da el espectro en frecuencias. Si el programa dispone de esta opción, la frecuencia de resonancia aparece de forma directa, con un «pico» claro para la frecuencia de resonancia.

Para la experiencia se almacenan botellas en una nevera con una temperatura controlada de 4,0 °C. Se determina la frecuencia de resonancia de 3 de estas botellas y se obtiene la frecuencia de resonancia. En la figura 3 se muestra un ejemplo de medida de una de estas botellas, tanto en tiempo como en espectro en frecuencias. Las frecuencias obtenidas son 1992, 1992,7 y 1992,3 Hz. La media es de 1992,3 Hz y la desviación estándar de 0,4 Hz. Utilizando las dimensiones medidas en la ecuación (1) la temperatura es de 3,1 °C. Esta desviación sistemática es debida a la estimación de las dimensiones y a las aproximaciones de la teoría.

Se han medido también botellas introducidas en un congelador con una temperatura controlada de -5,0 °C. Las medidas son 1171,1, 1172,6 y 1174,0 Hz. La media es 1172,6 Hz y la desviación estándar de 1,5 Hz. Hay que tener en cuenta que esta última medida debe ser rápida para evitar el calentamiento de la botella. Si se utiliza la expresión (1) se obtiene -6,1 °C. Se puede observar cómo esta desviación es aproximadamente la misma que en caso anterior (0,9 °C de diferencia). Esto es lógico, ya que se debe a una desviación de las dimensiones. Si se utiliza la expresión (2), la temperatura obtenida para la botella en el congelador es de -5,1 °C. Se puede ver cómo este segundo método es más estable.

Por último, se han dejado al sol tres botellas y un termómetro. Las botellas han dado 1253,5, 1256,7 y 1254,1 Hz, lo que da una media de 1254,8 Hz y una desviación estándar de 1,7 Hz. La temperatura obtenida según (2), tomando como patrón las botellas de la nevera es de 32,8 °C. El termómetro marcaba 33,5 °C.

En los tres casos anteriormente expuestos, el termómetro de control estaba situado fuera de la botella, por lo que pueden existir pequeñas variaciones de la temperatura debido a que la temperatura que se obtiene a partir de la frecuencia de resonancia es la temperatura del aire en el interior de la botella. Se decide realizar el experimento de esta forma debido a que la temperatura en el

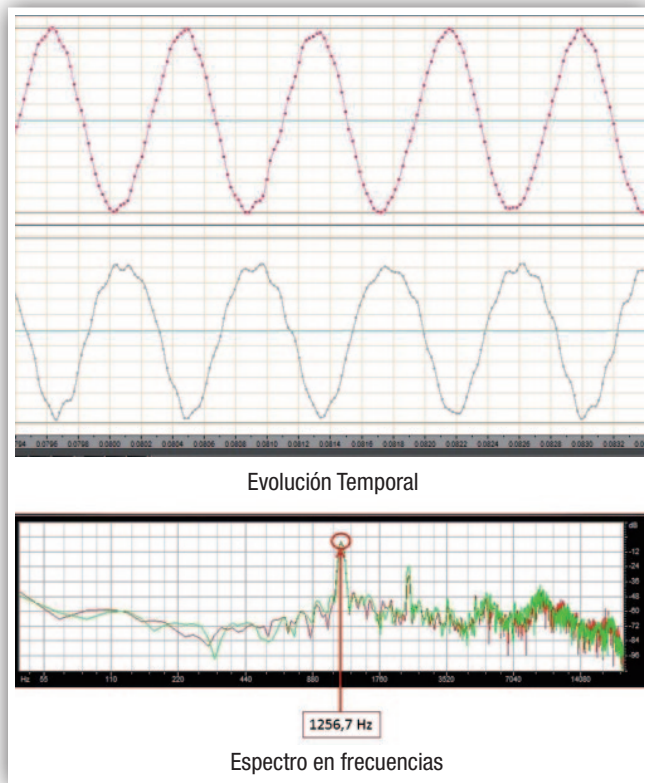


Figura 3. Ejemplos de señales captadas.

aire alrededor de la botella y la temperatura en el interior del cuello de la botella apenas serían sensiblemente diferentes. De esta forma se evita el contacto del termómetro con las paredes de la botella y supone un experimento de fácil reproducibilidad.

Referencias

- [1] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, «Fundamentals of Acoustics», John Wiley & Sons, Third Edition, 1982.
- [2] M. Recuero «Ingeniería Acústica», Ed. Paraninfo, Madrid.1995.
- [3] J. Alba, J. Ramis, «Determinación indirecta de la velocidad del sonido en el aire mediante resonadores de Helmholtz», Revista Española de Física Vol. 14, pp. 43-44, 2000.
- [4] J. Alba, J. Ramis, J. Martinez, R. Picó, E. Escuder, «Aplicación de los fenómenos ondulatorios de batido y resonancia para la determinación del volumen de líquido en una botella», Revista Española de Física Vol. 18, pp. 51-53, 2004.
- [5] L. Beranek, «Acoustics», Amer Inst of Physics, 1986.



Envíese a: **Revista Española de Acústica - SEA**
 e-mail: secretaria@sea-acustica.es
<http://www.sea-acustica.es>

Estoy interesado en:

- **ASOCIARME A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**
- **SUSCRIBIRME A LA REVISTA DE ACÚSTICA**

Apellidos: _____ Nombre: _____

Dirección para correspondencia: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

Centro de trabajo: _____

Puesto de trabajo: _____

Dirección: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

GIP, Global Insulation Package

SOLUCIÓN COMPLETA para la medición de aislamiento acústico:
MEDICIÓN – CÁLCULOS – INFORME



MI006
*Máquina
de impactos*



FP122
*Fuente Sonora
omnidireccional*

 **Bluetooth®**

SC420
*Sonómetro
Analizador de espectro*



SOFTWARE

*Cálculo de Aislamientos
CESVA Insulation Studio (CIS)*

*Ayuda a la medición
CESVA Measuring Assistant (CMA)*

CESVA
NOISE
MEASURING
INSTRUMENTS
SINCE 1969

Maracaibo, 6 - 08030 Barcelona (Spain)

T. (34) 934 335 240 info@cesva.com
F. (34) 933 479 310 www.cesva.com

SC420

Sonómetro Analizador de espectro



ON & PLAY

- Nueva forma ergonómica ·
- Plataforma modular ·
- Intuitivo. ON & PLAY Technology ·
- Memoria extraíble con tarjetas microSD ·
- Grabación de audio y comentarios de voz ·
- Automatismos: temporizadores y disparadores ·
 - Inicio/Parada de medición
 - Grabación de audio
- Preparado para monitorización ambiental ·
- Backerase y marcas ·
- Software: CESVA Memory Download (CMD) ·

MÓDULOS DE AMPLIACIÓN *opcionales:

- Bandas de octava
- Tercios de octava
- Prevención Laboral
- Análisis FFT
- Tiempo de Reverberación (impulso y corte)
- Grabación de audio avanzada (calidad análisis)



CESVA
NOISE
MEASURING
INSTRUMENTS
SINCE 1969

Maracaibo, 6 - 08030 Barcelona (Spain)

T. (34) 934 335 240
F. (34) 933 479 310

info@cesva.com
www.cesva.com