VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Construcción y caracterización de un volúmetro acústico de bajo costo

Construction and characterization of a low-cost acoustic volumeter

Maximo Ulises Hernández Estrada[1], Melissa Jocelyn Ortíz Velázquez[1], Christian Alejandro Cruz Alamilla[1], José de Jesús Martínez Díaz[1], Jorge Armando López Lemus[2], Omar-Jair Purata-Sifuentes[3]

[1]División de Ciencias Económico Administrativas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
[2]Departamento de Estudios Multidisciplinares, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato
[3]Departamento de Estudios Organizacionales, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
mu.hernándezestrada@ugto.mx, mj.ortizvelazquez@ugto.mx, ca.cruzalamilla@ugto.mx, jdj.martinezdiaz@ugto.mx, lopezja@ugto.mx, opurata@ugto.mx

Resumen

Se desarrolló un prototipo económico de volúmetro acústico utilizando dos bafles de audio reutilizados, un Arduino Uno R4 WiFi, dos micrófonos MAX4466 y un amplificador PAM8403. El prototipo no busca medir directamente el volumen de un objeto, sino identificar una condición de operación estable y repetible antes de su calibración. Se empleó un diseño factorial con tres frecuencias de excitación (150, 170, 190) Hz, dos tiempos de espera (1, 10) s y dos tiempos de adquisición (10, 30) s. Para cada uno de los 12 tratamientos, se realizaron cinco lecturas consecutivas con las cámaras cerradas y una pesa de sellado constante de 4.9 kg. La variable de respuesta fue la razón entre las amplitudes RMS de la cámara de medición y la cámara de referencia. Ninguna de las 60 lecturas mostró saturación. Se detectó un transitorio notable a 150 Hz con 1 s de espera y 10 s de adquisición, durante el cual la razón acústica se estabilizó gradualmente en las cinco mediciones. La menor variación ocurrió a 190 Hz con 10 s de espera y 30 s de adquisición, alcanzando un coeficiente de variación de 0.33 %. Sin embargo, la configuración de 170 Hz, con 1 s de espera y 10 s de adquisición, proporcionó un mejor equilibrio entre rapidez y consistencia, presentando un coeficiente de variación de 0.46 % y un tiempo aproximado de 11 s por lectura. Estos resultados establecen una condición operativa inicial para las próximas fases de calibración y evaluación de la reproducibilidad del prototipo.

Palabras clave: volúmetro acústico, Arduino, diseño de experimentos, instrumentación de bajo costo.

Introducción

Medir el volumen de un objeto cotidiano puede parecer fácil sobre todo para geometrías sencillas y regulares, en las que basta con conocer sus dimensiones (Purata et al., 2017). Para el caso de geometrías caprichosas, se puede aplicar el principio de Arquímedes y sumergir el objeto en un líquido de densidad conocida para observar cuánto volumen de él desplaza. Algo más complejo es trabajar con pesas patrón de masa, ya que para determinar su masa en aire con precisión se debe corregir el efecto del empuje del aire, que depende del volumen (o densidad) del patrón. El método estándar para encontrar el volumen suele ser la pesada hidrostática, pero implica sumergir la pesa en un líquido, limpiarla y secarla después, además de controlar posibles cambios por humedad o contaminación superficial (Purata, 2019).

Una opción es emplear el sonido. En un volúmetro acústico, un altavoz genera pequeñas variaciones de presión en una cámara cerrada. La introducción de un objeto reduce el volumen de aire disponible y altera la respuesta acústica del espacio. Estas variaciones pueden detectarse con micrófonos y relacionarse con el volumen del objeto, sin necesidad de tocarlo. Kobata et al. (2004) utilizaron este método en pesas de 100 g a 10 kg y demostraron que se podían obtener resultados similares a los de la pesada hidrostática, con una incertidumbre relativa del orden de 10^{-3}. Investigaciones posteriores desarrollaron sistemas con dos cámaras acústicas, una de referencia y otra de medición. Al comparar las presiones registradas en ambas cámaras, es posible compensar parcialmente las variaciones comunes de la excitación y reducir ciertos errores de no linealidad. Hu et al. (2017), por ejemplo, estudiaron pesas de 100 g a 5 kg y señalaron que es importante elegir cuidadosamente la frecuencia y la amplitud de la señal sinusoidal para mantener una razón de presiones estable. Más recientemente, Wang et al. (2022) usaron simulaciones y experimentos para

determinar los mejores parámetros de excitación en un volúmetro diseñado para pesas pequeñas. El principio acústico también se ha utilizado en objetos con formas irregulares y volúmenes pequeños, como semillas, demostrando que el método puede adaptarse a distintas escalas y usos. Sin embargo, estos desarrollos requieren instrumentos específicos, sistemas de adquisición de datos sofisticados o configuraciones diseñadas para calibrar y estimar con precisión el volumen (Sydoruk et al., 2020).

En la literatura existente, se documenta menos una etapa previa pero esencial, como lo es evaluar si un volúmetro hecho con componentes económicos y partes reutilizadas puede ofrecer una señal estable antes de intentar calibrarlo. Además, es necesario investigar, en cada configuración específica, cuánto tiempo se debe esperar tras iniciar la excitación, cuánto tiempo debe adquirirse la señal y qué frecuencia garantiza la mejor repetibilidad. La mayoría de los estudios previos se enfocan en sistemas especializados, precisión, corrección de no linealidades y optimización de instrumentos ya desarrollados. Por ello, en este trabajo se desarrolló un prototipo económico de volúmetro acústico empleando dos bafles reciclados, micrófonos comerciales, un amplificador de audio y un Arduino Uno R4 WiFi. En esta fase, no se midió aún el volumen de una pesa, sino que se enfocó en caracterizar la estabilidad de la respuesta acústica del dispositivo. A través de un diseño experimental, se evaluaron tres frecuencias de excitación, dos tiempos de espera y dos períodos de adquisición, manteniendo las cámaras cerradas y bajo condiciones de sellado uniformes. Esto permitió identificar transitorios de arranque y seleccionar una configuración práctica y repetible para las etapas de calibración venideras.

Materiales y Métodos

Se construyó un volúmetro acústico experimental de bajo costo con el propósito de estudiar la estabilidad de una señal asociada al volumen de aire contenido en una cámara cerrada. En esta etapa del proyecto no se pretendió convertir directamente la respuesta acústica en unidades de volumen, sino identificar una configuración de excitación y adquisición que produjera lecturas lo suficientemente repetibles como para continuar posteriormente con el ajuste y la calibración del instrumento. El diseño se inspiró en los volúmetros acústicos comparativos, en los que la respuesta de una cámara de medición se contrasta con la de una cámara de referencia. En estos sistemas, una excitación sonora produce variaciones de presión cuya amplitud depende, entre otros factores, del volumen de aire, de la geometría del recinto, de la frecuencia utilizada y de la posición de los sensores. El uso de dos cámaras permite trabajar con una razón de señales y reducir parcialmente la influencia de los cambios comunes en la excitación o en la electrónica. Este principio ha sido empleado previamente para determinar el volumen de patrones de masa y de otros objetos sin necesidad de sumergirlos en un líquido (Kobata et al., 2004; Hu et al., 2015).

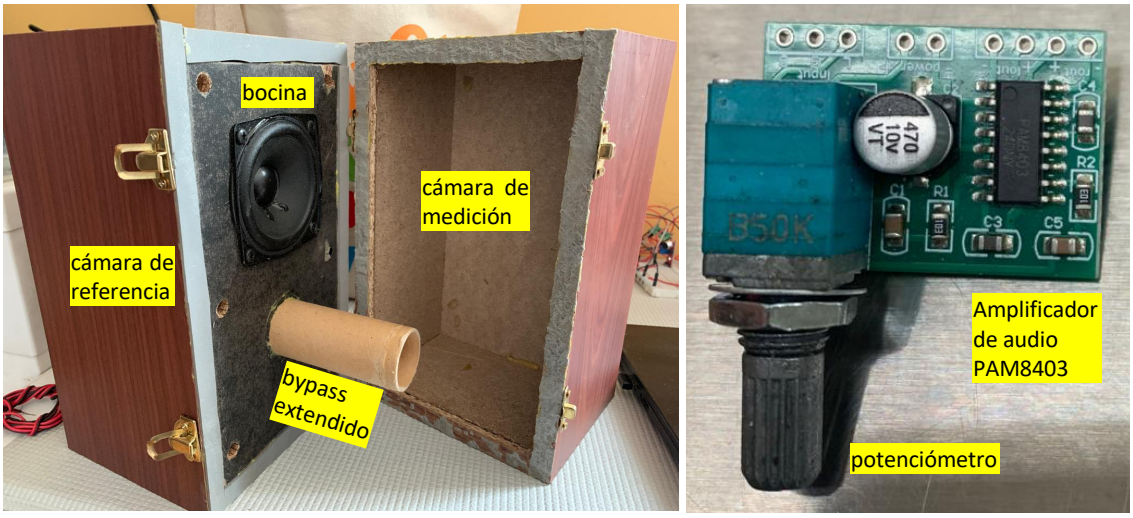
El sistema desarrollado no fue una réplica de algún instrumento comercial o científico publicado. Se construyó reutilizando dos bafles en desuso de un minicomponente Sony SS-CEH15 y componentes electrónicos de bajo costo disponibles comercialmente. Los bafles se ensamblaron de forma vertical, de manera que el superior funcionó como cámara de referencia y el inferior como cámara de medición. El bafle usado como cámara de referencia conservó su altavoz original y la mayor parte de su configuración física, solo le fue removida la pantalla frontal de malla. En cambio, al bafle destinado a la cámara de medición se le retiró la pared frontal que sostenía al altavoz y a su conducto bass-reflex original, con el fin de obtener un recinto interior vacío (Figura 1a). El bass-reflex de la cámara de medición, se unió al de la cámara de referencia con pegamento. Así, el tubo combinado (bypass) se alargó hasta llegar cerca del fondo de la cámara inferior.

Sellado y disposición mecánica del arreglo experimental

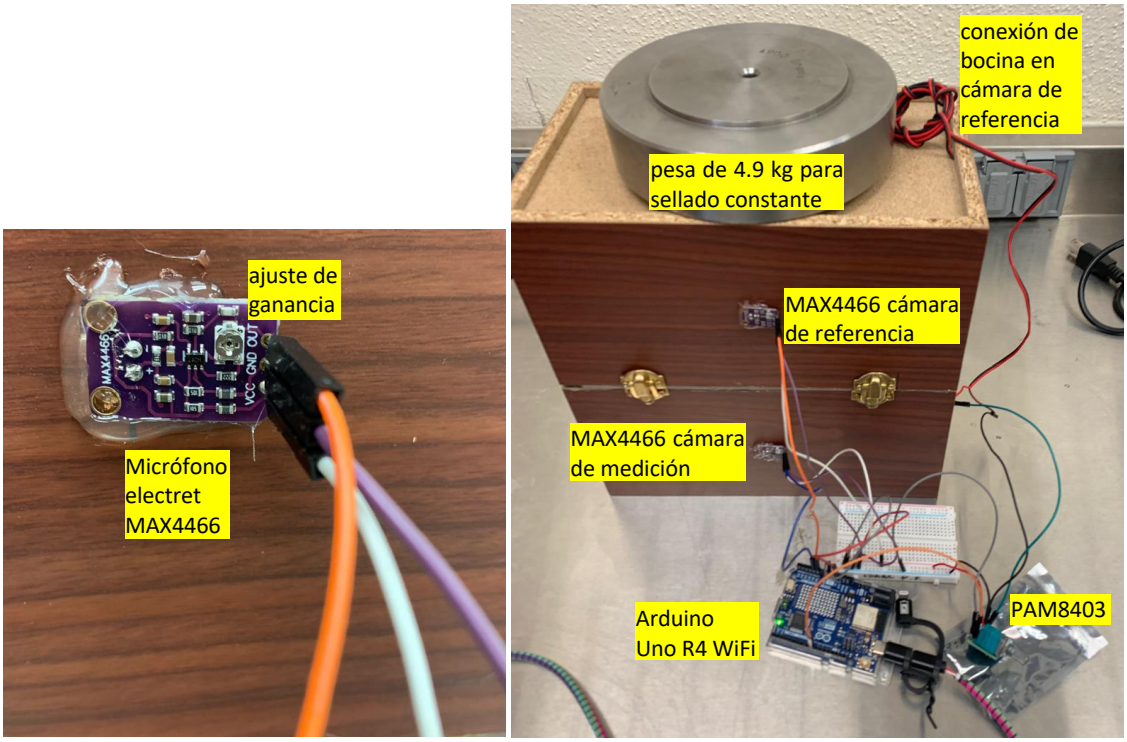
Durante el experimento, las cámaras se mantuvieron selladas mediante una pesa de 4 900 g colocada sobre la cámara superior (Figura 1d). Su función fue ejercer una carga constante sobre la unión y reducir fugas de sonido durante las mediciones. La posición de esta pesa se mantuvo sin cambios durante las 60 adquisiciones del diseño experimental. Una vez que se cerró el sistema, las cámaras permanecieron cerradas durante todo el experimento. Además, no se colocaron objetos en la cámara de medición. Esta elección facilitó analizar únicamente los efectos de la frecuencia, el tiempo de espera y el tiempo de adquisición, sin que estos se mezclaran con cambios provocados por abrir y volver a cerrar el instrumento, recolocar la pesa de sellado o alterar el volumen interno. Los cables, micrófonos, altavoz y módulos electrónicos se mantuvieron en la misma posición. Los potenciómetros de ganancia de los micrófonos y del amplificador fueron ajustados antes de

ISSN 2395-9797

iniciar el diseño experimental y no se cambiaron posteriormente. Además, el prototipo permaneció en el mismo lugar físico durante toda la secuencia de mediciones.



(a) (b)



(c) (d)

Figura 1. Componentes principales del volúmetro acústico experimental. (a) Vista general del prototipo instrumental con la cámara de referencia a la izquierda de la cámara de medición; (b) amplificador PAM8403 con potenciómetro incluido para control de ganancia y evitar saturación; (c) módulo de micrófono MAX4466 empotrado en pared de ambas cámaras, utilizado para registrar la señal acústica y (d) aplicación de una masa de 4.9 kg (para mantener constante el cierre entre las cámaras ya ensambladas), sistema de generación, amplificación y adquisición formado por el Arduino Uno R4 WiFi y el amplificador PAM8403.

Generación de la excitación acústica

La señal de excitación fue generada con un Arduino Uno R4 WiFi (Figura 1d). Esta placa cuenta con un microcontrolador Renesas RA4M1 de 32 bits y un convertidor digital-analógico, lo que facilitó la producción de una señal sinusoidal sin necesidad de un generador de funciones externo. La salida analógica del Arduino se conecta a un módulo amplificador PAM8403 (Figura 1b), que incluye un potenciómetro para ajustar el nivel de la señal. Este amplificador de audio clase D se usa en este montaje para suministrar la corriente necesaria para activar el altavoz del bafle de referencia, ya que el Arduino por sí solo no puede alimentar directamente una bocina de esa potencia. El nivel de amplificación se ajustó previamente, antes del experimento, para que las señales fueran claramente distinguibles del ruido, sin llegar a los límites del convertidor analógico-digital. Durante la ejecución del experimento no se alteró la posición del potenciómetro del amplificador. Se estudiaron tres frecuencias sinusoidales a 150 Hz, 170 Hz y 190 Hz. Este intervalo fue seleccionado tras exploraciones preliminares del sistema, donde esas frecuencias generaron respuestas detectables y permitieron trabajar sin saturación. Se incluyó la frecuencia como factor experimental porque la respuesta de un recinto acústico no varía necesariamente de manera monótona, es decir, algunas frecuencias pueden ofrecer mayor estabilidad o sensibilidad que otras. La búsqueda experimental de una frecuencia adecuada también se ha utilizado en trabajos de optimización de volúmetros acústicos de laboratorio (Wang et al., 2022).

Registro de señales

Se emplearon dos módulos de micrófono con preamplificador MAX4466 (Figura 1c). Uno fue colocado en la pared lateral de la cámara de referencia, mientras que el otro se ubicó en una posición similar en la cámara de medición. Las cápsulas quedaron orientadas hacia el interior de los recintos, y las aberturas se sellaron para reducir las fugas de aire alrededor de los sensores (ver Figura 1c). El MAX4466 es un preamplificador para señales de micrófono que proporciona una salida analógica, apta para ser leída por un microcontrolador. Los módulos utilizados tenían un ajuste de ganancia establecido previamente, que no se modificó durante todo el experimento. Las salidas de los dos micrófonos se conectaron a diferentes entradas analógicas del Arduino.

El programa adquirió ambas señales de manera alterna y almacenó, para cada canal: número de observaciones, media de las lecturas, amplitud RMS, valor mínimo y valor máximo. Las señales del micrófono estaban aproximadamente centradas en la mitad del rango del convertidor. Por ello, se calculó la amplitud RMS tras eliminar el valor medio de cada serie:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2},$$

Aquí, x_i representa una lectura del convertidor analógico-digital, $\bar{x}$ es el promedio de dichas lecturas, y n es el total de observaciones. Esta expresión mide la amplitud de la parte variable de la señal y evita que el nivel de polarización continua del micrófono domine el resultado.

La respuesta principal del experimento fue la razón $R = RMS_{medición} / RMS_{referencia}$, donde $RMS_{medición}$ es la amplitud registrada en la cámara inferior y $RMS_{referencia}$ es la amplitud registrada en la cámara superior. Usar una razón facilita la comparación simultánea de las respuestas de ambas cámaras. Una variación en el nivel de excitación puede influir en ambos canales, mientras que una diferencia entre ellos se refleja en el valor de R. En esta etapa, R se empleó como un indicador de estabilidad, no como una estimación directa del volumen.

Para adquisiciones de 10 s, se obtuvieron aproximadamente 96 000 pares de lecturas, mientras que para adquisiciones de 30 s, se registraron alrededor de 289 000. Esto corresponde a una frecuencia de muestreo efectiva de aproximadamente 9.6 kHz. Los resultados se transmitieron a través de la comunicación serial del Arduino y luego se copiaron a una tabla para su análisis (Figura 2).

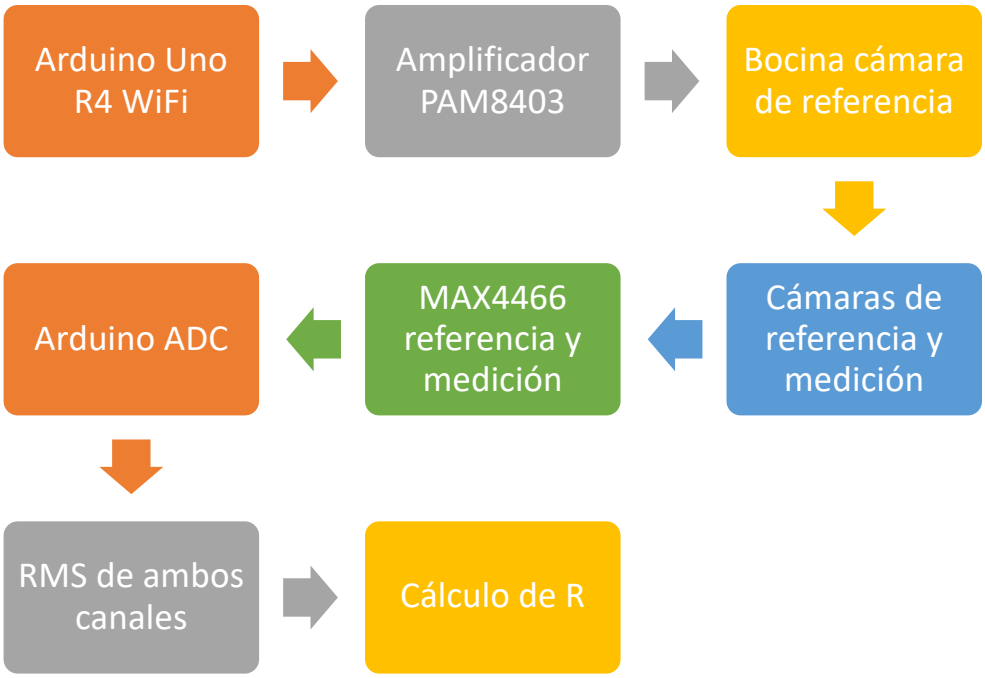


Figura 2. Diagrama funcional del sistema de excitación y adquisición. El Arduino generó una señal sinusoidal, amplificada por el PAM8403 y reproducida por el altavoz de la cámara de referencia. Dos micrófonos MAX4466 registraron las respuestas de las cámaras de referencia y medición y el programa calculó la razón entre sus amplitudes RMS..

Programa de adquisición

El programa en el Arduino recibe tres parámetros por comunicación serial: frecuencia de excitación, duración de la adquisición y tiempo de espera antes de comenzar. Luego de recibir la orden, el programa genera la señal sinusoidal, espera el intervalo establecido y captura las señales de ambos micrófonos durante el período definido. Al finalizar, calcula los estadísticos de ambos canales y envía una fila con los resultados. Cada lectura implicó introducir una instrucción nueva. Por lo tanto, las cinco observaciones de una misma condición correspondieron a cinco ejecuciones consecutivas del programa y no a cinco segmentos de una única adquisición prolongada.

Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño factorial completo de 3×2×2, donde los factores considerados fueron la frecuencia de estimulación, el tiempo de espera entre el inicio de la estimulación y la adquisición, y la duración de esta última.

***Tabla 1**. Factores y niveles del diseño de experimentos*

Factor	Niveles	Propósito
Frecuencia de excitación	150 Hz, 170 Hz, 190 Hz	Evaluar si la estabilidad depende de la frecuencia acústica
Tiempo de espera	1 s, 10 s	Determinar si el sistema necesita estabilizarse antes de adquirir datos
Tiempo de adquisición	10 s, 30 s	Evaluar si una adquisición más prolongada reducía la variación

El tiempo de espera se contó desde el inicio de la excitación hasta el comienzo del muestreo. El tiempo de adquisición correspondió al intervalo durante el cual se registraron las señales de ambos micrófonos.

Las combinaciones factoriales dieron lugar a 12 tratamientos. Para cada una, se realizaron cinco lecturas consecutivas, sumando un total de 60 resultados. Cada lectura inició con una instrucción nueva enviada al Arduino. Durante todas las lecturas de las condiciones, no se abrió la cámara, no se movió la masa de sellado y no se ajustó ningún potenciómetro. Aun cuando el orden de ejecución fue aleatorio, el experimento se consideró una caracterización factorial exploratoria y no una prueba confirmatoria completamente aleatorizada.

Protocolo experimental

Antes de ejecutar el experimento, se verificó que el altavoz, los micrófonos y el sistema de adquisición funcionaran correctamente. Se ajustaron el volumen del amplificador y las ganancias de los micrófonos hasta que ninguna señal alcanzara los niveles máximos o mínimos del convertidor (niveles de saturación).

El procedimiento aplicado para cada tratamiento fue el siguiente:

1. Se seleccionaron la frecuencia, el tiempo de espera y el tiempo de adquisición.
2. Se envió la instrucción al Arduino.
3. El sistema generó la excitación durante el tiempo de espera establecido.
4. Se registraron de manera alternada las respuestas de las dos cámaras durante el mismo intervalo de adquisición de 10 o 30 s.
5. El Arduino calculó los valores medios, RMS, mínimos, máximos y la razón entre amplitudes.
6. Se guardó la fila de resultados.
7. Se repitió la instrucción hasta completar cinco lecturas.
8. Se cambió al siguiente tratamiento sin abrir las cámaras ni remover el peso de sellado.

Las cinco lecturas se interpretaron como una estimación de la *repetibilidad inmediata* del sistema bajo una configuración fija. No se consideraron cinco réplicas experimentales completamente independientes, porque las cámaras no se desmontaron ni se volvieron a sellar entre ellas.

Procesamiento y análisis de los datos

Los resultados se estructuraron en una hoja de cálculo donde cada fila corresponde a una lectura de un determinado tratamiento. Además de registrar los tres factores experimentales y el orden de ejecución, se mantuvieron la media, *RMS*, valores mínimos y máximos de cada canal, así como la razón *R*. El análisis se llevó a cabo en el lenguaje *R* versión 4.5.1 usando *RStudio*. Se emplearon los paquetes **readxl** para importar la hoja de cálculo, **dplyr** para organizar los datos y **ggplot2** para crear las figuras. *R* es un entorno de programación diseñado para análisis estadísticos y producción reproducible de gráficos (R Core Team, 2025). El primer control consistió en revisar los valores mínimos y máximos. Se consideró saturada una lectura cuando alguno de los canales alcanzaba 0 o 1023 cuentas. Además, se marcaron las observaciones cercanas a estos límites para su inspección.

Para cada uno de los 12 tratamientos se calcularon: media, desviación estándar y coeficiente de variación (*CV*) de la razón *R*. El coeficiente de variación sirvió como indicador de repetibilidad, puesto que un valor bajo señala que las cinco lecturas fueron similares. Además, se mostraron las observaciones en el orden en que se realizaron, ya que una variación gradual entre la primera y la quinta lectura puede indicar un proceso de estabilización que no sería evidente solo con la media y la desviación estándar. Aunque el arreglo de factores sigue un diseño de experimentos factorial, el análisis en el artículo fue mayormente descriptivo. Las cinco lecturas consecutivas de una misma condición no se consideran cinco experimentos independientes, por lo que no se usaron pruebas de significancia como argumento principal para determinar qué factor era superior.

El diseño factorial se utilizó principalmente para identificar patrones, interacciones prácticas y configuraciones más estables. Es importante diferenciar entre repetir una lectura y tener una réplica experimental, especialmente en el análisis de diseños factoriales (Montgomery, 2019). La elección de la condición de operación se basó en reducir el coeficiente de variación y prevenir tiempos de espera y adquisición innecesariamente largos. Por eso, la configuración final no se seleccionó solo por tener un *CV* más bajo en números, sino porque lograba un balance entre repetibilidad y duración total de la medición.

Resultados

Se recopilaron 60 lecturas correspondientes a 12 combinaciones de frecuencia, tiempo de espera y tiempo de adquisición. Ninguna señal alcanzó los límites de 0 o 1023 cuentas del convertidor Arduino, por lo que no hubo mediciones saturadas. Además, los niveles promedio de ambos micrófonos permanecieron prácticamente constantes durante todo el experimento, lo que sugiere que las diferencias observadas se debieron principalmente a la amplitud de la señal acústica.

En once de las doce condiciones, la razón entre las amplitudes RMS de la cámara de medición y la cámara de referencia se mantuvo aproximadamente entre 0.95 y 0.98. La excepción fue la combinación de 150 Hz, 1 s de espera y 10 s de adquisición. En esa condición, la razón aumentó progresivamente desde 0.497 en la primera lectura hasta 0.968 en la quinta. Esta evolución ordenada mostró que el sistema todavía se encontraba en un período de estabilización y que las primeras observaciones no representaban un régimen estacionario (Figura 3).

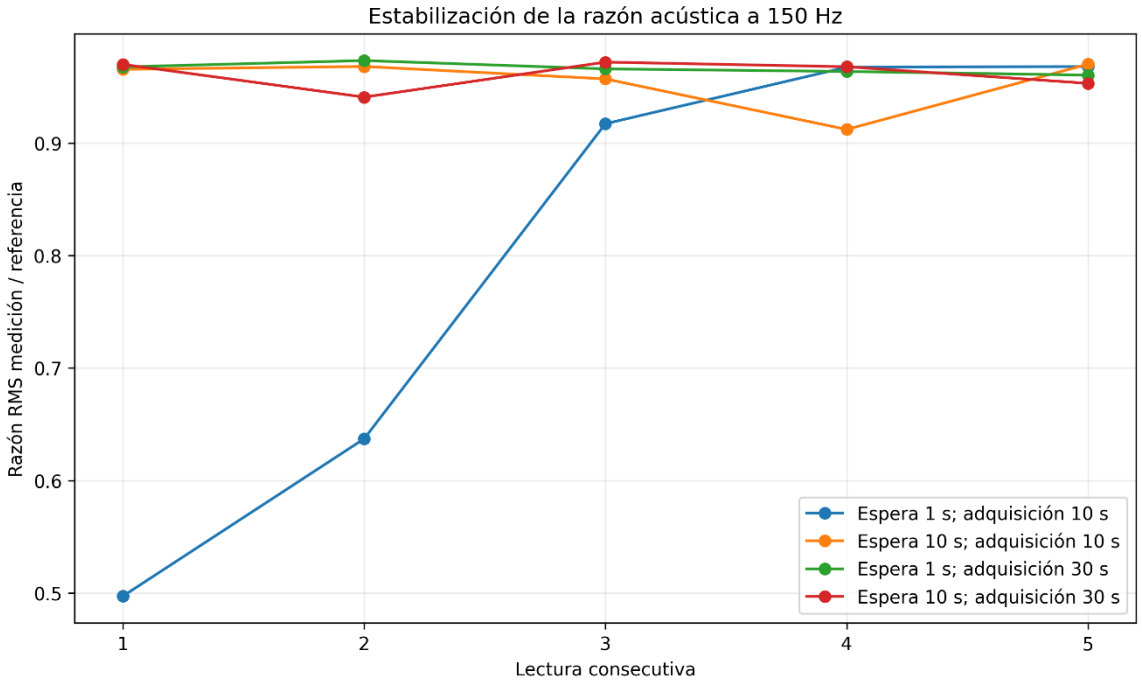


Figura 3. Evolución de la razón entre las amplitudes RMS de la cámara de medición y la cámara de referencia durante cinco lecturas consecutivas a 150 Hz. La combinación de 1 s de espera y 10 s de adquisición presentó un transitorio pronunciado, mientras las demás configuraciones permanecieron próximas a un régimen estable.

El transitorio se originó principalmente en la cámara de referencia. Su amplitud RMS bajó de 87.807 a 33.987 cuentas desde la primera hasta la quinta lectura, mientras que la amplitud en la cámara de medición bajó de 43.651 a 32.900 cuentas. Cuando ambos canales se estabilizaron, la razón se acercó a los valores que se habían obtenido con las demás configuraciones de 150 Hz

La repetibilidad inmediata se determinó evaluando el coeficiente de variación de cinco lecturas por condición. El valor más bajo fue 0.33 % en 190 Hz, con 10 s de espera y 30 s de adquisición. También se registraron valores bajos en condiciones similares: 190 Hz con 1 s de espera y 30 s de adquisición, 170 Hz con 10 s de espera y 30 s de adquisición, y 170 Hz con 1 s de espera y 10 s de adquisición, con coeficientes de variación que oscilaron entre 0.44 y 0.46 % (Tabla 2).

***Tabla 2**. Repetibilidad inmediata de la razón acústica.*

Frecuencia /Hz	Espera /s	Adquisición /s	Razón media	Desviación estándar	Coeficiente Variación /%
150	1	10	0.7974	0.2169	27.21
150	10	10	0.9546	0.0243	2.54
150	1	30	0.9662	0.0048	0.50
150	10	30	0.9607	0.0134	1.39
170	1	10	0.9707	0.0045	0.46
170	10	10	0.9681	0.0096	0.99
170	1	30	0.9566	0.0087	0.91
170	10	30	0.9696	0.0043	0.44
190	1	10	0.9584	0.0105	1.09
190	10	10	0.9586	0.0115	1.20
190	1	30	0.9588	0.0042	0.44
190	10	30	0.9545	0.0031	0.33

Cada resultado representa cinco lecturas consecutivas realizadas sin abrir las cámaras. El coeficiente de variación indica la repetibilidad inmediata de la adquisición, no su reproducibilidad tras abrir, cerrar o volver a montar el instrumento.

Los resultados indican que incrementar el tiempo de espera o de adquisición no siempre conduce a mejoras uniformes. A 190 Hz, aumentar el tiempo de adquisición de 10 a 30 s redujo la variación observada. A 150 Hz, una adquisición de 30 segundos impidió el transitorio extremo que se observaba con solo 10 segundos. Sin embargo, a 170 Hz, se alcanzó una repetibilidad de 0.46 % con solo 1 segundo de espera y 10 segundos de adquisición, un resultado comparable con configuraciones de mayor duración (Figura 4).

Considerando tanto la repetibilidad como el tiempo de cada lectura, la configuración provisional elegida fue de 170 Hz, con 1 segundo de espera y 10 segundos de adquisición. Esta opción toma aproximadamente 11 segundos por lectura, mientras que otra que tiene un menor coeficiente de variación requiere cerca de 40 segundos. Además, usar 170 Hz permite mantener la misma frecuencia de las pruebas preliminares con pesas, donde el instrumento demostró ser sensible a cambios grandes en volumen.

Estos resultados muestran la repetibilidad de la adquisición cuando las cámaras permanecen cerradas y sometidas a la misma fuerza de sellado. Sin embargo, no reflejan aún la reproducibilidad total del instrumento, ya que no consideran el efecto de abrir y cerrar las cámaras, volver a aplicar la fuerza de sellado o realizar mediciones en diferentes días.

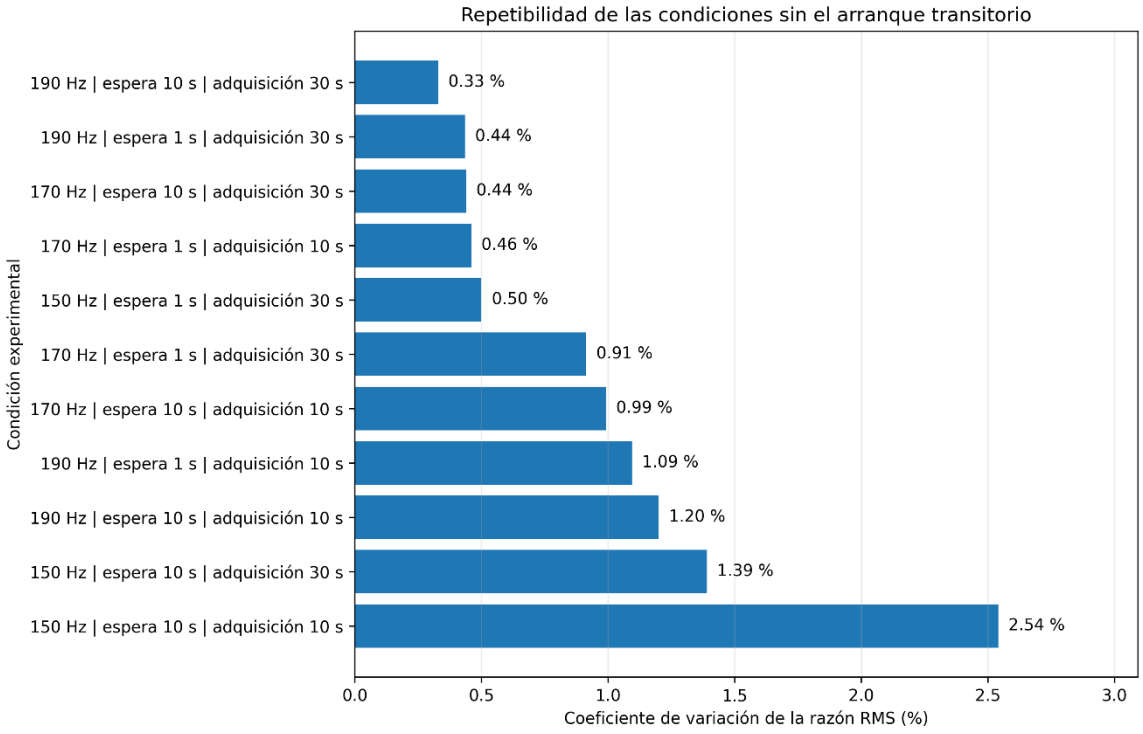


Figura 4. El coeficiente de variación de la razón acústica para las condiciones sin transitorio pronunciado de arranque muestra que valores menores indican una mejor repetibilidad inmediata. La condición de 150 Hz con 1 segundo de espera y 10 segundos de adquisición se evaluó aparte, ya que presentó un CV de 27.21% y mostró una evolución sistemática en las cinco lecturas.

Discusión

El diseño experimental evidenció que el prototipo puede producir una respuesta acústica estable en ciertas condiciones, incluso al estar construido con bafles reutilizados y componentes electrónicos económicos. En once de las doce combinaciones analizadas, la relación entre las amplitudes RMS de las cámaras estuvo aproximadamente entre 0.95 y 0.98. Además, varias configuraciones mostraron coeficientes de variación menores a 0.5 %, lo que indica que la repetibilidad inmediata es suficiente para continuar con la caracterización del instrumento. El efecto más destacado ocurrió a 150 Hz, tras 1 segundo de espera y 10 segundos de adquisición. En esta condición, la razón acústica aumentó de forma progresiva, desde 0.497 hasta 0.968 en cinco lecturas consecutivas. Este cambio no fue aleatorio ni se debió a la saturación de los sensores, la amplitud de la cámara de referencia disminuyó gradualmente hasta estabilizarse. Esto sugiere que el sistema empezó a registrar datos antes de que finalizara un transitorio acústico o mecánico.

La dependencia de la respuesta respecto a la frecuencia coincide con lo observado en volúmetros acústicos anteriores. Kobata et al. (2004) demostraron que los resultados podían variar según la frecuencia de excitación, mientras que Wang et al. (2022) analizaron específicamente la selección de parámetros para optimizar un sistema de medición de pesas. Los hallazgos de este estudio confirman que la elección de la frecuencia no debe basarse solo en la intensidad de la señal producida, sino que también es importante considerar el tiempo que tarda el sistema en estabilizarse y la consistencia de su respuesta. Utilizar dos cámaras sigue el principio de instrumentos acústicos con mayor tecnología. Hu et al. (2017) compararon presiones en una cámara de referencia y otra de medición para determinar el volumen de patrones de masa. En estos sistemas, la geometría, el volumen de aire remanente y la relación entre señales afectan los resultados. En el prototipo presentado, los bafles, el bass-reflex prolongado y la diferencia física entre las cámaras crean una configuración particular, es por eso que sus condiciones operativas debieron determinarse experimentalmente, sin poderse transferir directamente de otro instrumento.

Los resultados también indican que aumentar el tiempo de espera o extender el período de adquisición no siempre mejora la repetibilidad. A 190 Hz, extender la adquisición de 10 a 30 segundos redujo el coeficiente de variación. En cambio, a 170 Hz se logró una repetibilidad similar con solo 1 segundo de espera y 10 segundos de adquisición. Esto sugiere que los tres factores interactúan. Una adquisición más larga puede recopilar más datos, pero no siempre corrige variaciones lentas, cambios en la amplitud o pequeños desplazamientos en el estado acústico del sistema. La configuración con menor variación observada fue a 190 Hz, con 10 s de espera y 30 s de adquisición, presentando un coeficiente de variación de 0.33 %. Sin embargo, esta opción necesita aproximadamente 40 s por lectura. La combinación de 170 Hz, 1 s de espera y 10 s de adquisición tuvo un coeficiente de variación de 0.46 % y un tiempo aproximado de 11 s. Por ello, 170 Hz es una mejor opción inicial que balancea velocidad y repetibilidad (Kobata et al., 2004; Wang et al., 2022).

La diferencia entre 0.33 y 0.46 % no debe entenderse como prueba definitiva de que una configuración sea estadísticamente mejor. Cada condición se realizó una única vez en bloques de cinco lecturas consecutivas. Estas lecturas muestran la repetibilidad inmediata, pero no equivalen a cinco montajes independientes del instrumento. Por ello, el estudio debe ser considerado exploratorio. Otra limitación es que las cámaras no se abrieron durante las 60 mediciones. Esto permitió aislar los efectos de frecuencia, espera y adquisición, pero no se evaluó la reproducibilidad al abrir el sistema, colocar un objeto, volver a cerrar las cámaras y reposicionar la pesa de sellado. Las pruebas iniciales durante la construcción mostraron que el cierre puede alterar apreciablemente el valor de referencia del instrumento. Por ello, no se puede afirmar que la combinación elegida sea la más sensible a cambios pequeños en volumen. La configuración de 190 Hz fue la más estable, aunque no se comparó su respuesta ante objetos de volumen conocido. En la siguiente fase, se deberán evaluar tanto la repetibilidad de la señal con la cámara vacía como el cambio de la señal cuando se introduce un volumen conocido. Una frecuencia muy estable pero poco sensible podría resultar menos útil que otra ligeramente más variable, pero capaz de distinguir cambios pequeños (Hu et al., 2017).

Los estudios de Kobata et al. (2004) y Hu et al. (2017) compararon las estimaciones acústicas con métodos de referencia, demostrando que el principio puede usarse para determinar el volumen de patrones de masa. Otros enfoques han ampliado la volumetría acústica a objetos irregulares y volúmenes más pequeños, evidenciando la versatilidad del método (Sydoruk et al., 2020). El siguiente paso en el proyecto será relacionar la razón acústica con el volumen desplazado y comparar estos resultados con mediciones geométricas o hidrostáticas (Purata et al., 2017; Purata, 2019). El experimento logró transformar un montaje que solo genera y registra sonido en un instrumento con una condición de operación claramente definida. La contribución principal de esta etapa es la identificación de un transitorio de arranque y la selección fundamentada de una configuración rápida y repetible. Esto crea una base experimental sólida para avanzar con la calibración, estudiar la reproducibilidad del cierre y determinar el cambio de volumen mínimo que el prototipo puede detectar.

Conclusiones

El prototipo de volúmetro acústico económico demostró una repetibilidad inmediata adecuada en diversas condiciones operativas. El diseño experimental ayudó a detectar un transitorio pronunciado a 150 Hz con tiempos cortos y, como mejor opción práctica, se eligió la configuración de 170 Hz, 1 s de espera y 10 s de adquisición. Esta opción logró un coeficiente de variación de 0.46 % y un tiempo total cercano a 11 s por medición. Estos resultados confirman que el sistema puede generar una señal estable, aunque aún no se ha demostrado su precisión en la medición de volumen. Las etapas siguientes deberán evaluar la reproducibilidad tras abrir y cerrar las cámaras, crear una curva de calibración con volúmenes conocidos y comparar las estimaciones con un método de referencia.

Agradecimientos

Se agradece al apoyo otorgado por la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado por la beca otorgada al estudiante Máximo Ulises Hernández Estrada, del programa educativo de Licenciatura en Administración de la Calidad y la Productividad, de la División de Ciencias Económico Administrativas, durante la realización del XXXI Verano de la Ciencia.

Bibliografía/Referencias

Hu, M.-H., Wang, J., Zhang, Y., Cai, C.-Q., Zhong, R.-L., Ding, J.-A., Yao, H., & Jiao, K. (2015). Experimental research on the volume determination of mass standards using acoustic volumeter. In XXI IMEKO World Congress: Measurement in Research and Industry (pp. 199-202). International Measurement Confederation.

Hu, M. H., Wang, J., Zhang, Y., Cai, C. Q., Zhong, R. L., Ding, J. A., & Ren, X. P. (2017). Research on volume determination of mass standards with two acoustic measuring chambers. *Acta IMEKO, 6*(2), 8-12. doi: 10.21014/acta_imeko.v6i2.337

Kobata, T., Ueki, M., Ooiwa, A., & Ishii, Y. (2004). Measurement of the volume of weights using an acoustic volumeter and the reliability of such measurement. Metrologia, 41(2), S75-S83. https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/2/S08

Montgomery, D. C. (2019). Design and analysis of experiments (10th ed.). Wiley.

Purata Sifuentes, O. J. (2019). Determinación Mejorada del Volumen de Pesas Patrón por Medición Geométrica. Entreciencias: Dialogos En La Sociedad Del Conocimiento, 7(20). https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.67514

Purata-Sifuentes, Omar-Jair, Arámburo-Botello, Carlos A., Ramírez, Israel Salvador, O-Martínez, José Luis De la, & Funes-Rodríguez, Elvia. (2017). Medición del volumen de pesas de referencia de balanzas de presión mediante comparador óptico. Nova scientia, 9(18), 118-132. https://doi.org/10.21640/ns.v9i18.746

R Core Team. (2025). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.5.1) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing.

Sydoruk, V. A., Kochs, J., van Dusschoten, D., Huber, G., & Jahnke, S. (2020). Precise volumetric measurements of any shaped objects with a novel acoustic volumeter. *Sensors, 20*(3), Article 760. doi: 10.3390/s20030760

Wang, J., Han, Z., Peng, C., & Wu, D. (2022). Preliminary study of parameter optimizations toward a lab-designed acoustic-based volume measuring system for weights. Measurement, 197, 111244. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111244