

# DESARROLLO EN LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ACÚSTICA

*M. en C. Guillermo Silva Pineda, M. en C. Sergio R. Rojas Ramírez, Ing. Arturo Ruiz Rueda  
Centro Nacional de Metrología. División de Vibraciones y Acústica.  
km 4,5 carr. a los Cués, Mpio. del marqués, Qro, CP: 76900  
Tel (01 4) 110551 Fax (01 4) 110553 email: [gsilva@cenam.mx](mailto:gsilva@cenam.mx)*

## 1. Resumen

Se describen los desarrollos experimentales y el estado actual de los marcos conceptuales en las mediciones de la magnitud de presión acústica. Se resaltan los avances equivalentes publicados que pueden ser implementados en las capacidades actuales de los laboratorios de calibración en acústica. Se hacen recomendaciones para incrementar la exactitud en los arreglos experimentales y se proponen modelos que describen el comportamiento de los sensores que han mostrado mayores desarrollos tecnológicos, estabilidad temporal y linealidad, indicando algunos de los factores que contribuyen a la variabilidad experimental.

## 2. Introducción

El presente artículo se ha obtenido haciendo referencia a otros que datan de los años 70's, por lo tanto es posible que existan algunos aspectos que a la fecha hayan sido mejorados considerablemente. Sin embargo, se hace ésta referencia porque se ha encontrado que en esa fecha, el desarrollo teórico – experimental en el área de la acústica era importante y es posible que los laboratorios relacionados con mediciones de presión acústica encuentren útiles los diagnósticos y hallazgos publicados en ese entonces para su desarrollo conceptual y experimental.

Es necesario mencionar además que el presente forma parte de una serie de documentos emitidos, diagnosticando la situación de la exactitud en la calibración de micrófonos por sustitución, de donde se desprende la propuesta de cambiar la comparación de las tensiones de salida de dos micrófonos por la determinación del Nivel de Presión Acústica, NPA, de un pistófono de referencia controlando la presión estática durante la medición.

Sin embargo, se considera importante primero publicar el nivel actual de las mediciones de presión acústica en su disseminación desde el sistema primario a través de los sistemas de transferencia, v.g., micrófonos, calibradores acústicos, sonómetros, mastoides artificiales, dosímetros, audiómetros, etc.

## 3. Desarrollo

El micrófono de condensador tiene características tales como alta estabilidad y respuesta plana en frecuencia combinadas con una sensibilidad razonablemente grande que le permiten ser considerado como patrón de referencia en la medición de la presión acústica.

El micrófono de condensador consiste básicamente en un diafragma metálico y un plato posterior que constituyen los electrodos de un capacitor. Se carga el capacitor con una tensión eléctrica en CD, llamada tensión de polarización con un valor nominal de 200 V. Así, las variaciones en la capacidad causadas por las ondas sonoras que golpean el delgado diafragma, se transforman en variaciones de tensión eléctrica.

Una condición necesaria en todo micrófono de condensador es que la constante de tiempo de carga del circuito sea lo suficientemente grande para mantener constante la carga del capacitor. Para incrementar la variación relativa en la capacidad, y mediante ésta la

sensibilidad, la capacitancia del micrófono de condensador y del amplificador deben ser lo más pequeño posible.

Por lo tanto el micrófono y el preamplificador se conectan juntos. La pequeña capacitancia requiere una alta impedancia para asegurar una buena frecuencia baja de corte. El preamplificador se diseña como un seguidor de cátodo, que “transforma” la impedancia de entrada de un micrófono normal en la alta impedancia necesaria para la toma de mediciones eléctricas.

Los arreglos experimentales y mediciones eléctricas necesarios para determinar la sensibilidad de los micrófonos de condensador y el NPA serán analizados a continuación, considerando el estado actual de los procedimientos de medición y calibración.

La sensibilidad de un micrófono está relacionada con la distancia entre el diafragma y el plato posterior, que es de alrededor de 20  $\mu\text{m}$ . La expansión térmica de los materiales provoca variaciones en esta distancia en valores de alrededor de  $20 \times 10^{-6} \times 13.9 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$  para un diafragma con tensión constante. Sin embargo, no solo la temperatura sino también la presión estática pueden afectar la sensibilidad del micrófono.

Si la presión del aire frente al micrófono se incrementa (o se reduce), la distancia entre el diafragma y el plato posterior cambiará debido a la deflexión del diafragma. Si las variaciones de presión están dentro del intervalo de frecuencias en las que se debe usar el micrófono para hacer mediciones acústicas, las variaciones de presión sólo se registran en uno de los lados del diafragma, esto se logra mediante el trabajo adecuado de los tubos capilares de la cápsula de micrófono.

Tal como se había mencionado, para cargar la cápsula del micrófono se usa una tensión de polarización en CD de 200 V. La sensibilidad de los micrófonos se relaciona con esta tensión de polarización tal como lo expresa la ecuación 1.

$$e = E_0 \frac{X}{X_0} \text{Sen } \omega t \quad (1)$$

se puede ver que la tensión de salida,  $e$ , es directamente proporcional a la tensión de polarización,  $E_0$ , e inversamente proporcional a la distancia entre el diafragma y el plato posterior,  $X_0$ , cuando la vibración del diafragma es,  $X \text{ Sen } \omega t$ . Cuando la tensión de polarización cambia, también cambia la atracción electrostática entre el diafragma y el plato posterior, cambiando en forma proporcional la distancia  $X_0$ . Por tanto, el cambio en la sensibilidad será mayor que el cambio relativo en la tensión de polarización.

De la discusión anterior se concluye que la distancia entre el diafragma y el plato posterior es una función de la tensión de polarización. Dado que esta distancia es uno de los principales factores que determinan el amortiguamiento mecánico en el diafragma, un cambio influenciará la respuesta a la frecuencia del micrófono, especialmente a altas frecuencias.

Otro factor que depende de la rigidez del diafragma y el amortiguamiento del aire detrás del diafragma es el volumen equivalente de la cápsula del micrófono. Es especialmente importante conocer este volumen cuando se realizan mediciones en acopladores acústicos, debido a que el volumen del acoplador se incrementa por esta cantidad. El volumen equivalente de aire se puede medir por medio de un resonador de paredes rígidas, tal como el que se observa en la figura 1.

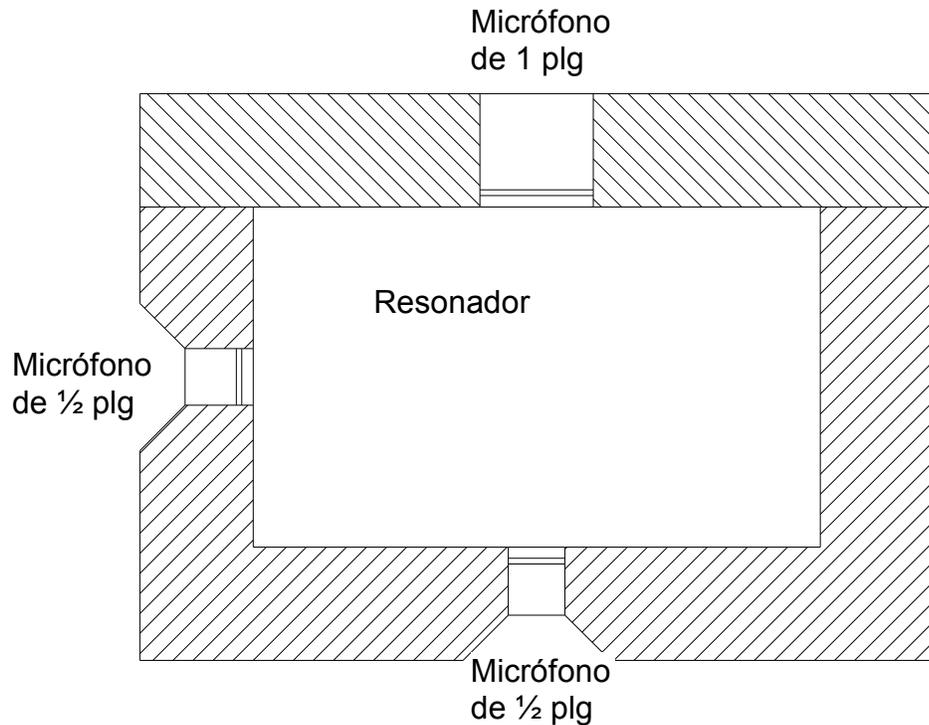


Figura 1. Arreglo experimental para determinar el volumen de aire equivalente de una cápsula de micrófono de condensador.

Cuando se determina la frecuencia de resonancia, el micrófono se reemplaza por un tope sólido, y entonces se mide otra vez la frecuencia de resonancia. A partir de estas dos mediciones es fácil determinar la corrección en la cavidad causada por el volumen equivalente del micrófono. Un método equivalente al indicado fue reportado por *T.F.W. Embelton e I.R. Dagg, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canadá, en la reunión de la ASA en Washington, D.C., en Mayo de 1958.*

Con el volumen de la cavidad,  $V$ , identificando un capacitor equivalente,  $C$  ( $C = \text{const } V$ ), y el ducto identificando una inductancia equivalente,  $L$ , la frecuencia de resonancia puede escribirse como se muestra en la ecuación 2.

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Entonces se introduce la frecuencia de resonancia medida con el micrófono, incrementada por una cantidad,  $\Delta f$ , correspondiente a un incremento en el volumen,  $\Delta V$ . Consecuentemente se puede escribir la relación 3.

$$\frac{f}{f + \Delta f} = \sqrt{\frac{C + \Delta C}{C}} = \sqrt{\frac{V + \Delta V}{V}} \quad \Delta V \approx -2 \cdot V \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (3)$$

### 3.1 Consideraciones sobre la calibración de micrófonos

Se puede realizar la estimación de la incertidumbre global en la calibración de micrófonos de condensador conociendo la incertidumbre de las mediciones de barómetros, voltímetros,

preamplificadores y amplificadores, atenuadores, balanzas, resistores y capacitores, que son de importancia en el arreglo experimental durante la realización de la presión acústica.

Cuando se realizan mediciones de presión acústica las magnitudes involucradas son dos, v.g., la sensibilidad nominal de los micrófonos de condensador y el NPA en condiciones estables. Las mediciones se realizan en un intervalo de frecuencias con condiciones de respuesta plana de los micrófonos y valores aceptables en la relación señal a ruido eléctrico. Es recomendable usar un mismo preamplificador siempre con una sola cápsula de micrófono, dado que es práctico considerarlo parte del micrófono en los presupuestos de incertidumbre, midiendo únicamente la tensión de salida en CA del conjunto.

Es práctica de algunos laboratorios de calibración reportar la sensibilidad de la cápsula en función de la fuerza electromotriz del micrófono cuando está trabajando dentro de una impedancia infinita. Si se usa la técnica de inserción de tensión, la falta de exactitud en la determinación de la capacitancia y la ganancia del preamplificador se pueden eliminar en gran medida.

Desde el punto de vista del fabricante probablemente es una ventaja reportar la fuerza electromotriz de la cápsula, dado que es mayor y no depende de algún cambio en el preamplificador. Si la tensión es referida a la salida del preamplificador, la sensibilidad generalmente será de 1,5 a 3 dB menor.

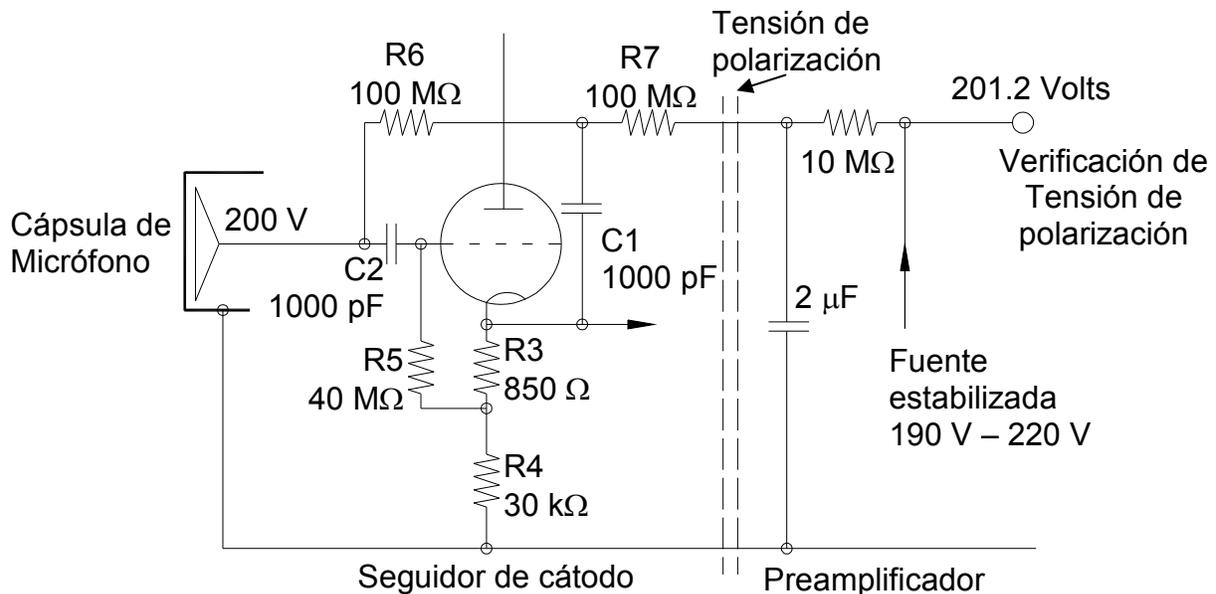


Figura 2. Diagrama del preamplificador Tipo 2613 y la alimentación de la tensión de polarización en un amplificador de micrófono Tipo 2603.

En la figura 2 se muestra el diagrama del preamplificador usado, el Tipo B&K2613, donde la impedancia de entrada se ha incrementado mediante una retroalimentación positiva. La retroalimentación también se usa para incrementar la impedancia aparente de los resistores, R6 y R7, que alimentan la tensión de polarización a la cápsula. Se puede observar que con cualquier escurrimiento de corriente en la cápsula de micrófono, los capacitores C1 y C2 o en general el circuito resultará con una tensión de polarización menor a la cápsula. Por lo

tanto es muy importante que la posible caída de tensión se reduzca comprobando que la resistencia de aislamiento en los diferentes componentes sea lo suficientemente grande. Esto se puede realizar con un voltímetro sensible a tensiones dentro del intervalo de 195 V a 250 V, y una impedancia de entrada mayor a  $10^7$  M $\Omega$ . Se han reportado caídas de la tensión de polarización entre 1 V y 1,4 V. La incertidumbre en la aplicación del valor exacto de la tensión de polarización de un día a otro puede llegar hasta  $\pm 0,5$  V. Por lo tanto es muy importante especificar un determinado preamplificador para un cierto micrófono si se requiere un alto grado de exactitud.

### **3.2. Factores de incertidumbre**

El presupuesto de incertidumbres para determinar la sensibilidad de una cápsula de micrófono y el NPA en condiciones estables incluye factores tales como los que se listan a continuación,

- A. Incertidumbres de la tensión de polarización del micrófono
- B. Cambios en la sensibilidad y capacitancia del preamplificador
- C. Incertidumbres en el atenuador incluyendo errores de frecuencia
- D. Incertidumbres en la medición de la tensión eléctrica
- E. Incertidumbres en la sensibilidad de la cadena de medición

En diversas ocasiones se ha reportado que los métodos de mayor exactitud usan el pistófono de dos pistones y el método de reciprocidad. El pistófono es una fuente de NPA conocido y de alta exactitud, donde los componentes de la incertidumbres son la tensión de polarización, las capacitancias de entrada del preamplificador, la ganancia del conjunto preamplificador - amplificador y la medición de la tensión eléctrica; además se ha observado que el método de reciprocidad, especialmente el que usa como referencia resistencias eléctricas y no capacitores eléctricos, es el más exacto para determinar la sensibilidad de los micrófonos.

Se puede decir que para determinar el NPA el método del pistófono de doble pistón es suficientemente, sin embargo para la calibración de cápsulas de micrófono, el método de reciprocidad es superior; también se ha demostrado que el método de reciprocidad que usa como referencia resistencias eléctricas es mejor que el que usa capacitores.

## **4. Resultados**

En la tabla 1 se exponen los resultados de la calibración secundaria de un micrófono de condensador marca B&K modelo 4133, calibrado bajo las siguientes condiciones:

- a) se utiliza el método de inserción de tensión.
- b) la fuente acústica es un pistófono de doble pistón.
- c) se utilizan micrófonos patrón calibrados por el método de reciprocidad.
- d) la medición se llevó a cabo a la presión ambiental del laboratorio de 811 hPa

*Tabla 1 Resultado de calibración*

Medición	Sensibilidad (dB)	Sensibilidad (mV/Pa)	Desviación estándar (mV/Pa)
Medición 1	-38,44	11,97	0,0058
Medición 2	-38,43	11,98	0,0028
Medición 3	-38,44	11,97	0,0068

En la tabla 2 se muestran los índices de reproducibilidad y repetibilidad

*Tabla 2 Indices de reproducibilidad y repetibilidad*

Indice	Valor
Repetibilidad	0,0054
Reproducibilidad	0

La sensibilidad reportada es la sensibilidad a circuito abierto, es decir, la sensibilidad en las terminales del micrófono sin tener en cuenta el preamplificador.

La presión atmosférica es medida por medio de un barómetro analógico con una resolución de  $\pm 2,5$  hPa en el intervalo de 700 hPa a 1010 hPa

## 5. Conclusiones

El índice de reproducibilidad resultado de las mediciones es alto. El índice de repetibilidad puede mejorarse si se controla la presión estática durante la toma de mediciones.

El principal factor de variación en las mediciones de presión acústica es la presión estática del aire, por lo tanto, dicha variación se puede reducir controlando la presión estática durante la calibración y midiéndola con alta exactitud; además al hacer mediciones a la presión estática de referencia, 1013 hPa, se evita el uso del factor de corrección por presión, eliminando una de las fuentes de incertidumbre.

Actualmente, se usan barómetros con una resolución de  $\pm 2,5$  hPa en el intervalo de 700 hPa a 1010 hPa, y de  $\pm 1,5$  hPa a la presión de referencia de 1013 hPa. Se puede incrementar la exactitud de medición incrementando la resolución en la medición de la presión estática.

Otro de los factores de incertidumbre son los volúmenes frontal y equivalente de los micrófonos de condensador usados en las mediciones. Esos parámetros se determinan durante la calibración por reciprocidad, sin embargo, es recomendable comprobarlos induciendo una variación conocida de volúmenes en un resonador acústico de paredes rígidas.

Se ha observado que el NPA de los pistófonos patrón muestran variaciones menores que cuando se usan otros medios. Por tanto, es necesario incrementar progresivamente el número de mediciones del NPA en los pistófonos de doble pistón, reduciendo así proporcionalmente la variabilidad al agregar grados de libertad y estimar con mayor confianza el NPA nominal de dichos pistófonos.

Finalmente, se recomienda hacer comparaciones cruzadas entre las determinaciones del NPA usando pistófonos, determinando los parámetros acústicos con pruebas adicionales, y las sensibilidades nominales de los micrófonos patrón usando el método de reciprocidad

que usa capacitores de referencia. Es recomendable investigar los factores que provocan las diferencias encontradas entre las determinaciones de ambos métodos de medición.

## **6. Referencias**

1. Gunnar Rasmussen, A new condenser microphone, B&K Selected Technical Review, 1972.
2. D. Sc. Per V. Brüel, The accuracy of condenser microphone calibration methods. Part I and Part II. B&K Selected Technical Review, 1972.
3. Ing. Arturo Ruiz R., Ing. Gilberto Loera M., Ing. Adolfo Esquivel D., M. en C. Sergio Rojas R., M. en C. Guillermo Silva P., Informe de actividades para el mejoramiento de las mediciones del nivel de presión acústica (NPA) en el laboratorio de calibración de patrones de transferencia (LPT). Informe interno DVA – CENAM, Enero '99.
4. Ing. Arturo Ruiz R., M. en C. Sergio Rojas R., M. en C. Guillermo Silva P., Mediciones del nivel de presión acústica a nivel de referencia en la cámara de presión. Informe interno DVA – CENAM, Mayo '99.
5. Ing. Arturo Ruiz R, 510-AC-P.003, Procedimiento de calibración de micrófonos de condensador y prepolarizados por el método de sustitución. Procedimiento interno DVA – CENAM, Enero 1999.