

ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN POR PRESIÓN DE UN MICRÓFONO UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ACTUADOR ELECTROSTÁTICO

Muñiz L.*[§], Rojas S.* , Elías A. *

* Centro Nacional de Metrología. División de Vibraciones y Acústica, [§] Instituto Tecnológico de Celaya

* km 4.5 carr. a los Cués Mpio. del Marqués, Qro. México C.P. 76241

[§] Av. Tecnológico y A. García Cubas S/N, Celaya, Gto. México C.P. 38010

+52 42110551, +52 42110553 lmuniz@cenam.mx

Resumen: La presión atmosférica afecta la rigidez del diafragma de un micrófono, dando como resultado un incremento de su sensibilidad. A bajas frecuencias, la respuesta del micrófono es determinada fundamentalmente por la tensión del diafragma. Uno de los factores más importantes en la calibración de micrófonos es la corrección por presión [2,5]. Este trabajo presenta algunos resultados de la estimación de este factor, utilizando el método del actuador electrostático. Se proporciona una ecuación para obtener el cambio de sensibilidad de un micrófono Brüel & Kjær modelo 4133, como una función de la presión barométrica en el intervalo de 820 hPa a 1020 hPa, a una frecuencia de 250 Hz.

INTRODUCCIÓN

El micrófono es un transductor utilizado para convertir las variaciones de presión acústica en señales eléctricas. El micrófono de condensador ilustrado en la figura 1, básicamente consiste de un delgado diafragma metálico y una placa trasera que constituyen los electrodos de un capacitor [1]. Cargando el capacitor con una tensión DC, llamada tensión de polarización, las variaciones en la distancia entre las placas del capacitor producida por la presión acústica (sonido) que está incidiendo sobre el diafragma, dan como resultado un cambio en la distancia entre los electrodos y en la capacitancia del micrófono.

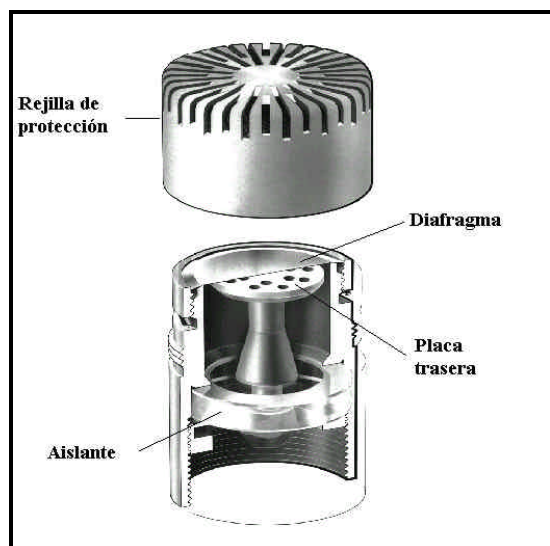


Figura 1. Micrófono de condensador

El aire que está dentro del micrófono influye en la rigidez del diafragma, este llega a ser de hasta el

20% (dependiendo del tipo de micrófono) de la rigidez total del sistema [1,2].

Alrededor de la frecuencia natural, la respuesta de un micrófono es determinada en mayor grado por la pérdida de energía en el sistema vibrante. Esta pérdida se debe al flujo de aire en los orificios de la placa trasera del micrófono. El aire que se encuentra en los orificios, alrededor de la frecuencia natural, también se considera como parte de la masa del diafragma [4]. Esta masa cambia con la presión atmosférica, afectando de esta forma la respuesta del micrófono a altas frecuencias [1].

DESARROLLO

Actuador electrostático

El actuador electrostático ilustrado en la figura 2, es una rejilla metálica que se sitúa sobre el diafragma del micrófono. Cuando se aplica una tensión DC a la rejilla, el diafragma es atraído por la fuerza electrostática producida.



Figura 2. Actuador electrostático

Comparado con la generación de una presión acústica controlada, una presión electrostática es constante en función de la frecuencia e independiente de las condiciones ambientales [2].

El método del actuador electrostático es usado ampliamente por laboratorios para obtener la respuesta a la frecuencia de los micrófonos, debido a que no requiere ningún recinto específico, como una cámara anecoica o una cámara reverberante[2].

Presión electrostática

El actuador produce una presión electrostática que actúa sobre el diafragma del micrófono como si se tratara realmente de una presión acústica, y está diseñado para distribuir uniformemente la presión sobre toda la superficie del diafragma.

La presión electrostática producida por un actuador, puede calcularse considerando al actuador y al diafragma como las placas de un capacitor. La energía instantánea almacenada en un capacitor, puede expresar en términos eléctricos mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{E_0^2 \cdot e \cdot A}{2 \cdot d} = F \cdot d \quad (1)$$

Donde:

$$C = \frac{e \cdot A}{d}$$

E_0 = Tensión eléctrica entre las placas

C = Capacitancia eléctrica entre las placas

F = Fuerza electrostática

d = Distancia entre las placas

e = Constante dieléctrica del gas entre las placas (aire = 8.85×10^{-12} F/m)

A = Área de la placa (actuador)

Sustituyendo y reorganizando términos se obtiene la ecuación (2) para la presión electrostática:

$$P_e = \frac{F}{A} = \frac{e \cdot E_0^2}{2 \cdot d^2} \quad (2)$$

Esta ecuación es válida para un actuador que tiene un área activa del mismo tamaño que el área del diafragma, sin embargo esto último no se cumple y en la mayoría de los casos el área del diafragma es mayor, por lo tanto, es necesario introducir un término R , que es la relación del área activa del actuador respecto a la del diafragma del micrófono, dando como resultado la ecuación (3):

$$P_e = \frac{e \cdot E_0^2}{2 \cdot d^2} \cdot R \quad (3)$$

Proceso de medición[5]

Dentro de una cámara de presión se coloca el micrófono bajo medición, se monta en el preamplificador, se retira la rejilla protectora y se le coloca cuidadosamente el actuador electrostático adecuado al tamaño del micrófono.

Se incrementa la presión barométrica dentro de la cámara, y se realizan mediciones de la tensión de salida del micrófono y de la presión barométrica dentro del intervalo de 820 hPa a 1020 hPa, en incrementos de 20 hPa; posteriormente se calcula la sensibilidad del micrófono para cada punto medido y se calcula la tasa de cambio de la sensibilidad con respecto a la presión barométrica dentro de la cámara. Terminado el proceso, se realizan mediciones despresurizando la cámara en el intervalo de 1020 hPa a 820hPa.

La figura 3 muestra el arreglo del equipo para llevar a cabo las mediciones.

Análisis de datos

Si la sensibilidad del micrófono a circuito abierto se conoce de su calibración, la sensibilidad a las condiciones de medición puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{med} = S_{1013} + S_r \quad (4)$$

Donde:

S_{med} = Sensibilidad del micrófono a las condiciones de medición

S_{1013} = Sensibilidad del micrófono a las condiciones de referencia(calibración)

S_r = Cambio de sensibilidad del micrófono

El cambio de sensibilidad del micrófono se calcula para cada punto de medición con la expresión:

$$S_r = 20 \text{ Log} \frac{E}{E_{1013}} \quad (5)$$

Donde:

S_r = Cambio de sensibilidad del micrófono

E = Tensión eléctrica a la salida del micrófono a condiciones de medición

E_{1013} = Tensión eléctrica a la salida del micrófono a las condiciones de referencia

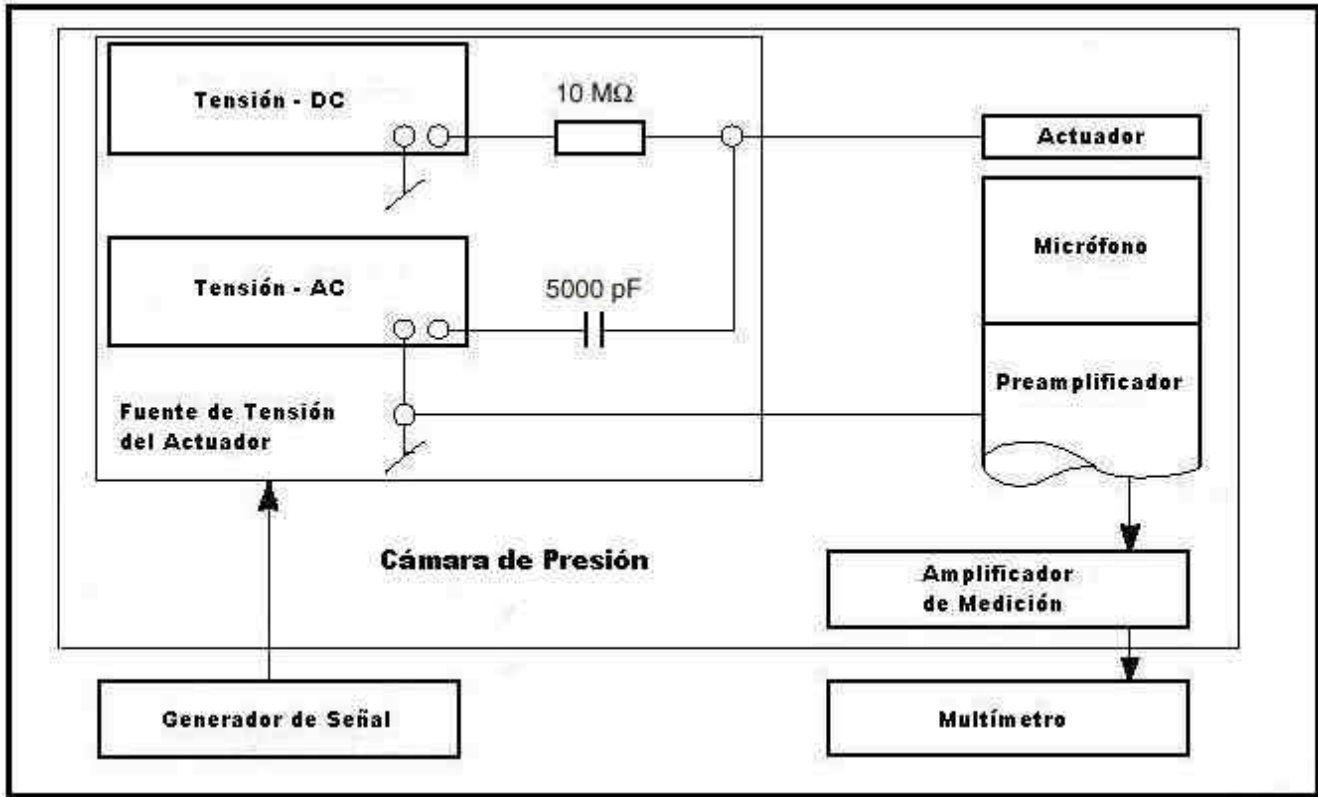


Figura 3. Esquema de la conexión del equipo

Los resultados obtenidos se plasman en una gráfica de presión barométrica contra sensibilidad.

$$S_{med} = m \cdot P_{med} + b \quad (6)$$

Donde:

S_{med} = Sensibilidad del micrófono a las condiciones de medición

P_{med} = Presión barométrica dentro de la cámara de presión

m = Pendiente de la recta presión barométrica - sensibilidad

b = Ordenada al origen

Los datos se aproximan mediante una recta por el método de mínimos cuadrados, de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} b \\ m \end{bmatrix} = (P^T P)^{-1} P^T S \quad (7)$$

Donde:

$$S = \begin{bmatrix} S_{med(1)} \\ S_{med(2)} \\ \dots \\ S_{med(N-1)} \\ S_{med(N)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{med(1)} & 1 \\ P_{med(2)} & 1 \\ \dots & \dots \\ P_{med(N-1)} & 1 \\ P_{med(N)} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

El factor de corrección por presión es la pendiente de la recta de la ecuación 6 y sus unidades se expresan en dB/hPa.

RESULTADOS

Las pruebas fueron realizadas a un micrófono de condensador marca Brüel & Kjær modelo 4133 que tiene las siguientes características nominales especificadas por el fabricante:

- Sensibilidad a circuito abierto
-38 dB re 1 V/Pa Equivalente a: 12,5 mV/Pa
- Factor de corrección por presión @ 250 Hz
0,0007 dB/hPa

De la calibración del micrófono por el método de sustitución, utilizando micrófonos patrón calibrados por el método de reciprocidad se obtuvo lo siguiente:

- Sensibilidad a circuito abierto
-38,44^δ dB re 1 V/Pa Equivalente a: 11,96 mV/Pa

^δ La sensibilidad se expresa para la presión barométrica normalizada de 1013 hPa

A continuación se muestran los resultados utilizando el actuador electrostático, a una frecuencia de 250 Hz.

Tabla 1. Cambio de sensibilidad del micrófono con la presión estática

Presión estática Incremento (hPa)	Sensibilidad Ref. S ₁₀₁₃ ξ (dB)	Presión estática Decremento (hPa)	Sensibilidad Ref. S ₁₀₁₃ ξ (dB)
820,1	0,07	819,6	0,15
840,1	0,08	840,1	0,13
860,0	0,07	860,0	0,11
880,0	0,06	880,1	0,10
900,0	0,06	900,0	0,09
920,0	0,05	919,8	0,07
940,0	0,04	940,0	0,05
960,0	0,03	959,8	0,04
980,0	0,02	980,0	0,02
1000,0	0,01	1000,0	0,01
1013,0	Ref.	1013,1	Ref.
1020,0	0,00	1020,0	0,00

ξ Cambio de sensibilidad referida a 1013 hPa

Con los datos anteriores se estima el cambio de sensibilidad con respecto al cambio de presión barométrica, dando como resultado lo siguiente:

Coeficiente de corrección por presión promedio @ 250 Hz	- 0,000587 dB/hPa
---	--------------------------

Durante las mediciones anteriores se observa que las lecturas de tensión, obtenidas cuando se incrementa la presión dentro de la cámara, difieren de las que se obtienen cuando se disminuye, además se observa que la diferencia entre las tensiones tomadas a 820 hPa y 1020 hPa no es muy significativa, solo 8 mV. Por tanto, se efectúa una prueba adicional, con las siguientes modificaciones:

Se incrementa la ganancia en la salida del amplificador del micrófono en 40 dB, por otro lado, se eleva la presión de la cámara desde la presión atmosférica (comúnmente 810 hPa) hasta 1020 hPa, y se mantiene esta presión por un tiempo, posteriormente se disminuye la presión desde 1020 hPa hasta lograr el equilibrio con la presión atmosférica, este proceso se realiza con el micrófono dentro de la cámara y con el equipo listo para iniciar las mediciones, esto se hace para someter al micrófono a los cambios de presión y para superar el primer ciclo del fenómeno de histéresis.

A continuación se muestran los resultados utilizando el actuador electrostático y con las modificaciones al procedimiento mencionadas, a una frecuencia de 250 Hz.

Tabla 2. Cambio de sensibilidad del micrófono con la presión barométrica

Presión estática Incremento (hPa)	Sensibilidad Ref. S ₁₀₁₃ ξ (dB)	Presión estática Decremento (hPa)	Sensibilidad Ref. S ₁₀₁₃ ξ (dB)
820,1	0,11	820,0	0,12
840,0	0,10	840,1	0,11
860,0	0,09	860,1	0,10
880,0	0,08	880,0	0,09
900,0	0,06	900,0	0,07
920,0	0,05	920,0	0,06
940,0	0,04	940,0	0,05
959,9	0,03	960,0	0,04
979,9	0,02	980,0	0,02
1000,0	0,01	1000,0	0,01
1013,0	Ref.	1013,1	Ref.
1020,0	0,00	1020,0	0,00

ξ Cambio de sensibilidad referida a 1013 hPa

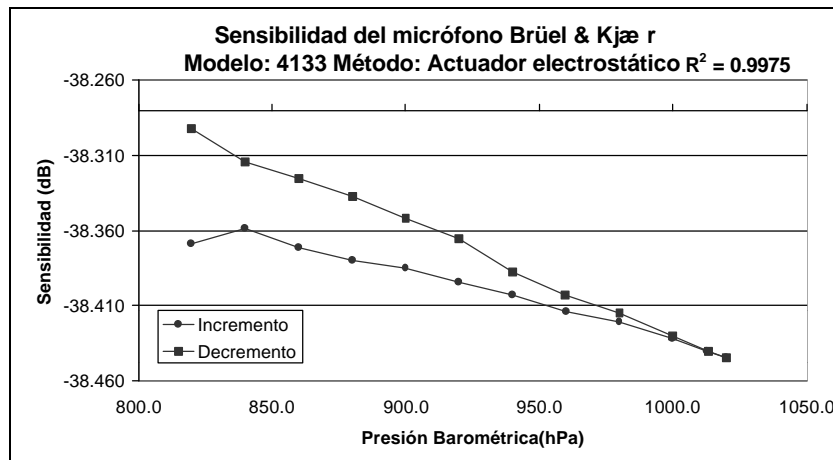
Con los datos anteriores se estima el cambio de sensibilidad con respecto al cambio de presión barométrica, dando como resultado lo siguiente:

Coeficiente de corrección por presión promedio @ 250 Hz	- 0,000592 dB/hPa
---	--------------------------

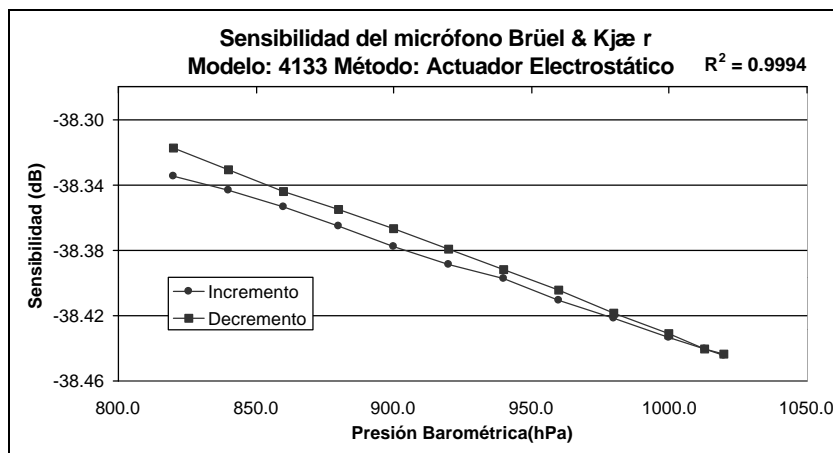
La siguiente tabla muestra un resumen de resultados:

Tabla 3. Coeficientes de corrección por presión promedio @ 250 Hz

	En sentido ascendente (dB/hPa)	En sentido descendente (dB/hPa)
1ª Prueba	- 0,000419	- 0,000755
2ª prueba	- 0,000556	- 0,000629



Gráfica 1. Resultados obtenidos con actuador electrostático en la primera prueba



Gráfica 2. Resultados obtenidos con actuador electrostático, en la prueba modificada

Las gráficas anteriores muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas, y en las mismas se puede apreciar la respuesta del micrófono a los cambios de presión estática, así como el valor de R cuadrado para cada prueba. Los puntos de las gráficas representan el promedio de 10 lecturas que adquiere el sistema.

CONCLUSIONES

Se observa que la tensión de salida del micrófono cuando se incrementa la presión barométrica en la cámara, es diferente a las que se obtiene cuando se realiza el proceso en sentido inverso, i. e., cuando se despresuriza la cámara.

La mejor manera de estimar los factores de corrección por presión de un micrófono es realizando la prueba con una ganancia de 40 dB a la salida del amplificador del micrófono y un ciclo de presurización antes de tomar mediciones. Esto debido a una mejor relación entre el cambio de la sensibilidad del micrófono y la presión, pues realizando la prueba de

esta forma el coeficiente de correlación R es mayor que el de la prueba inicial. Esto último puede atribuirse a que al realizar un ciclo de presurización se supera el primer ciclo del fenómeno de histéresis que presenta el diafragma del micrófono y el barómetro

REFERENCIAS

- [1] Brüel & Kjær, Data Handbook, Condenser Microphones and microphone preamplifiers for acoustics measurements, 1982, 87-90.
- [2] W. Embleton & S. K.Wong, AIP Handbook of Condenser Microphones theory, calibration and measurements, 1995, 231-246.
- [3] Brüel & Kjær, Microphone Handbook (Technical Documentation), Vol. 1, 1996, 2-54;2-58.
- [4] Mario Rossi, Acoustics and Electroacoustics, 1988, 487-498.
- [5] Informe interno. División de Vibraciones y acústica, Laboratorio de Patrones de Transferencia (Determinación del coeficiente de corrección por presión de micrófonos), 2000.