

XIII Congreso Argentino de Acústica
VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas
Buenos Aires, 29 y 30 de octubre de 2015

AdAA2015-A019

Micrófonos MEMS: Análisis y caracterización acústica

Fernando M. Gonzalez ^{1(a)},
Juan A. Rosales^(a),
Rodrigo Perez^(a),
Valentin I. Lunati^(a),
Aldo H. Ortiz Skarp^(a,b)

(a) Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), FRC - UTN - UA CONICET, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. lunativ@gmail.com. <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>

(b) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Rivadavia 1917, C.A.B.A., Argentina. <http://www.conicet.gov.ar/>

Abstract

The improvement and cheapening of microelectromechanical systems (MEMS) has allowed the development of microphones with excellent performances, enabling the acquisition of high-fidelity audio on inexpensive and portable devices. However, the manufacturers of these devices generally report only electrical and integration specifications without giving many details of their acoustic features. Furthermore, by using the same techniques of semiconductor manufacturing and interfaces immune to noise, electronics development processes and installation of microphones in electronic devices that integrate them are simplified. In this paper, we present results of acoustic measurements made with a MEMS microphone that are available on the market contrasting with the data provided by the manufacturer and a reference microphone. Finally, reports progress in the implementation of these transducers in Human-Machine Interfaces and Robotics Audition.

Resumen

El perfeccionamiento y abaratamiento de los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) ha permitido el desarrollo de micrófonos de excelentes performances, posibilitando la adquisición de audio de alta fidelidad en dispositivos portátiles y de bajo costo. En contrapartida, los fabricantes de estos dispositivos generalmente informan sus especificaciones eléctricas y de integración sin dar muchos detalles de las acústicas. Por otro lado, gracias al uso de las mismas técnicas de fabricación que los componentes electrónicos semiconductores y de interfaces más inmunes al ruido, se simplifican los procesos de desarrollo y montaje de los micrófonos en los dispositivos electrónicos que los integran. En este trabajo, se presentan resultados de mediciones acústicas realizadas con un micrófono MEMS disponible en el mercado contrastándolo con los datos provistos por el fabricante y un micrófono de referencia. Finalmente, se presentan avances en la aplicación de estos transductores en interfaces Hombre-Máquina y audición robótica.

1 Introducción

Durante las últimas décadas se fueron desarrollando y perfeccionando nuevas tecnologías de fabricación de dispositivos electrónicos semiconductores. De manera más reciente, se comenzó a implementar estructuras mecánicas en conjunto con las eléctricas, llamadas MEMS, aprovechando las propiedades físicas y químicas de los materiales semiconductores. El principal sector beneficiado por estos desarrollos fue el de los sensores, lográndose transductores de grandes prestaciones, integrables con el resto de la electrónica y casi independiéndose de problemas de ruidos y acondicionamiento de señal. Los micrófonos no fueron la excepción y también se comenzaron a desarrollar con tecnología de semiconductores, obteniéndose destacables características eléctricas y acústicas en dispositivos de reducidas dimensiones y bajo costo.

En este trabajo, se realiza un estudio detallado de las tecnologías de micrófonos MEMS disponibles en el mercado y se presentan resultados de mediciones acústicas realizadas con un modelo comercial en particular contrastándolos con los datos provistos por el fabricante. Además, se presentan algunas de las aplicaciones y proyectos en curso sobre interfaces Hombre-Máquina y audición robótica utilizando estos micrófonos.

2 Micrófonos MEMS

Los micrófonos MEMS son transductores de audio fabricados utilizando una tecnología llamada MEMS, Micro (o nano) Electrical-Mechanical System. Esta tecnología permite la construcción de artefactos mecánicos y eléctricos utilizando tecnología de fabricación CMOS estándar, la misma utilizada para la mayoría de los componentes electrónicos modernos. La utilización de este tipo de tecnología presenta numerosas ventajas, en particular, la posibilidad de integrarse con electrónica analógica y digital en el mismo dispositivo. De esta manera, se obtienen micrófonos que integran toda la etapa de acondicionamiento e incluso digitalización de la señal y ofrecen a su salida una representación eléctrica del nivel de presión sonora a su entrada de una manera mucho más aprovechable en sistemas electrónicos.

En este tipo de micrófonos, en general, se utiliza un transductor de efecto capacitivo constituido por una membrana de material semiconductor, que vibra en función de las variaciones de nivel de presión sonora (SPL por sus siglas en inglés) que ingresa a la cavidad interior del dispositivo y por otra membrana fija. En el mismo sustrato en el que se construye la membrana, o quizá en otro si se utilizan procesos diferentes, se coloca toda la electrónica necesaria para la polarización de la membrana y la recuperación de la señal de audio. Para esta última tarea, en general se utilizan dos métodos, en uno se hace variar la frecuencia de un oscilador en función de las variaciones de presión en la membrana y en el otro, manteniendo la carga del capacitor constante, la señal de audio se recupera como variaciones de tensión sobre el capacitor (Zwyssig, 2009). A estos circuitos integrados (CI) construidos sobre un sustrato semiconductor se los denominan ASIC, siglas en inglés para Circuito Integrado de Aplicación Específica.

En consecuencia, se puede decir que los micrófonos MEMS son básicamente iguales a los micrófonos de condensador de tipo “electret”, solo que construidos con el proceso de fabricación CMOS. Este tipo de proceso afecta el comportamiento del micrófono, presentando ventajas y desventajas con respecto a los micrófonos convencionales. Además, sus especificaciones son ligeramente diferentes debido principalmente a que estos micrófonos están compuestos por una parte acústica (transductor acústico-eléctrico) y otra electrónica. Posteriormente se describirán las principales especificaciones de estos micrófonos y cómo se diferencian de las de los convencionales.

2.1 Especificaciones típicas de los micrófonos MEMS

2.1.1 Sensibilidad

La sensibilidad de un micrófono es la respuesta eléctrica de su salida a una entrada acústica dada (en general para una onda senoidal de 1 kHz a 94 dB). La sensibilidad en decibelios de un micrófono es típicamente un valor negativo, por lo tanto, una alta sensibilidad es un valor pequeño en valor absoluto. En general, la sensibilidad de los micrófonos MEMS analógicos se especifica en dBV. En los micrófonos MEMS digitales la sensibilidad se especifica en dBFS, decibelios referenciados a la salida a fondo de escala, y se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$Sensibilidad_{dBFS} = 20 \log_{10} \frac{Sensibilidad_{\%FS}}{Salida_{REF}} \quad (1)$$

En donde $Sensibilidad_{\%FS}$ es el valor digital que produce el micrófono para un nivel L_p de 94 dB de entrada, como porcentaje con respecto al valor de fondo de escala y $Salida_{REF}$ es el valor digital a fondo de escala (1.0). (Lewis, 2011)

2.1.2 Directividad

Los micrófonos MEMS en general son omnidireccionales, es decir, tienen la misma sensibilidad al sonido proveniente de todas las direcciones, sin importar la orientación del mismo.

2.1.3 Relación Señal/Ruido

Especifica la relación de una señal de referencia con el nivel de ruido a la salida del micrófono. Esta incluye el ruido producido por el micrófono y la electrónica incorporada en el encapsulado del micrófono MEMS. En decibelios, la relación señal ruido (S/R) es la diferencia entre el nivel de ruido y la señal de referencia estándar de 1 kHz a 94 dB. La especificación es típicamente para un ancho de banda de 20 kHz y se incluye un factor de corrección correspondiente a la sensibilidad del oído humano a diferentes frecuencias.

Las primeras generaciones de micrófonos MEMS tenían una S/R de alrededor de 58 dB a 60 dB, pero en la actualidad la performance de estos está incrementando drásticamente, llegando a S/R de 66 dB (29 dBA EIN; ver 2.1.5). En comparación con los micrófonos de condensador electret, se puede decir que a igualdad de S/R , los micrófonos MEMS son mucho más pequeños y que estos últimos mantienen una mejor respuesta en frecuencia respecto a variaciones de temperatura. (Analog Devices, 2012).

2.1.4 Rango Dinámico

Es la diferencia entre el nivel de presión sonora más alto y el más bajo para los que se obtiene una respuesta lineal del micrófono. La mayoría de los micrófonos MEMS responde linealmente hasta una entrada acústica máxima de 120 dB, por lo tanto, el rango dinámico de un micrófono MEMS es su $S/R + 26$ dB (120 dB – 94 dB = 26 dB).

2.1.5 Ruido de Entrada Equivalente (EIN)

Es el nivel de ruido en la salida del micrófono, considerado como una fuente de ruido externa presente en la entrada del micrófono, expresado en dB. EIN puede calcularse a partir del Rango Dinámico o de la S/R :

$$EIN = \text{máximo nivel de entrada acústica} - \text{Rango Dinámico}$$

$$EIN = 94 \text{ dB} - S/R$$

2.1.6 Respuesta en Frecuencia

La respuesta en frecuencia de un micrófono describe la variación de su sensibilidad en función de la frecuencia. Las frecuencias de corte inferior y superior son los puntos en los cuales la sensibilidad cae 3 dB con respecto a la de 1 kHz (normalizada a 0 dB). La respuesta en frecuencia de un micrófono MEMS típico es de 100 Hz a 15 kHz.

La especificación de la respuesta en frecuencia incluye los valores máximos y mínimos de picos dentro de una banda dada tomando como referencia los 0 dB a 1 kHz. Además, los fabricantes especifican una máscara de respuesta en frecuencia, la cual muestra los valores límites máximos y mínimos de la salida del micrófono en el ancho de banda especificado.

2.1.7 Distorsión Armónica Total (*THD*)

Es la medida del nivel de distorsión en la señal de salida para un tono puro a la entrada. Dicho valor es expresado en porcentaje. Este porcentaje es la suma de las potencias de todas las frecuencias armónicas de la señal de entrada:

$$THD_{(5th-order)} = \frac{\sum_{x=1}^5 Potencia(f_{armónica_x})}{Potencia(f_{fundamental})} \quad (2)$$

En los micrófonos MEMS, la *THD* se calcula usualmente con las primeras cinco armónicas de la fundamental. Un valor más alto de *THD* indica un mayor nivel de armónicos presentes en la salida del micrófono.

El nivel de la señal típica de entrada para esta medición es de 105 dB, 11 dB por encima del valor de referencia $L_n = 94$ dB. Esto es porque, a medida que el nivel de la señal de entrada acústica incrementa, la medida de *THD* incrementa también. La regla empírica dice que la *THD* se triplica por cada 10 dB del nivel de señal de entrada. Por lo tanto, *THD* menor a 3 % a 105 dB significa que la *THD* será menor al 1 % a 95 dB.

2.1.8 Rechazo de Fuente de Alimentación (*PSR*)

Es la medida de la habilidad del micrófono para rechazar el ruido presente en los terminales de la fuente de alimentación en la señal de salida. Se mide acoplando una señal (onda cuadrada) de 10 mV pico a pico a 217 Hz en la V_{DD} del micrófono. La especificación de *PSR* es la medida del nivel de esa señal en la salida del micrófono. Esta medición se realiza a esa frecuencia debido a que en aplicaciones de teléfonos GSM sus fuentes de alimentación generalmente trabajan a 217 Hz, siendo esta la principal fuente de ruido.

2.1.9 Máxima Entrada Acústica

Es el máximo nivel de presión sonora a la entrada del micrófono antes que comience a recortar. El nivel en que comienza a recortar se define cuando la *THD* es 10%. La máxima entrada acústica se define en L_{pico} , no en rms. (Lewis, 2011)

2.2 Tipos de micrófonos

Como se mencionó anteriormente, los micrófonos MEMS integran la electrónica de acondicionamiento de señal y pueden integrar la etapa de digitalización de la misma. Esto da lugar a dos tipos principales de micrófonos MEMS: analógicos y digitales. Los primeros, ofrecen un nivel de tensión a su salida, proporcional al nivel de presión sonora presente a la entrada. Los digitales, ofrecen una salida digital, en general de con algún tipo de interface serial a través de un solo pin y requiriendo de una señal de reloj.

Debido a que los micrófonos MEMS terminan siendo otros componentes en los sistemas electrónicos, estos utilizan interfaces de conexión típicas de CI analógicos o digitales.

2.2.1 Micrófonos con salida analógica

Los primeros micrófonos MEMS poseían una interfaz de salida analógica debido a que no contenían la electrónica integrada que poseen en la actualidad. Estos dispositivos, deben ser polarizados adecuadamente, y su salida, ser conectada a un amplificador de alta impedancia de entrada. Además, se recomienda colocar capacitores de desacople de CC en serie con la salida. Este tipo de interfaz es cada vez menos utilizada y la mayoría de los nuevos dispositivos que aparecen en el mercado implementan algún tipo de interfaz digital como las que se describirán posteriormente.

2.2.2 Micrófonos con salida digital

La tendencia actual en los diseños de sistemas de audio es de incorporar las etapas de acondicionamiento y digitalización dentro de los CI, debido a esto empiezan a cobrar gran importancia los tipos de interfaces utilizadas para transportar las señales entre circuitos. En diseños actuales, estas interfaces se usan desde el transductor hasta los amplificadores de potencia, de esta manera, se obtienen sistemas de audio totalmente digital. Las interfaces más utilizadas para comunicaciones entre CI son I²S, TDM, PDM y entre sistemas, S/PDIF, ADAT, Ethernet AVB, entre otras.

La interfaz I²S, Inter-IC Sound, introducida por Philips en 1986, es la más utilizada en los sistemas de audio digital. Utiliza tres líneas para la transferencia de datos: reloj de bit, reloj de palabra y línea de datos. Los dispositivos conectados a la misma pueden ser configurados como maestro o esclavos. Para transmitir más de dos canales por una sola línea de datos se utiliza el formato TDM (Multiplexación por División de Tiempos), aunque esta interfaz no está totalmente estandarizada como la I²S.

Otra interfaz que está cobrando popularidad es la Modulación por Densidad de Pulso (PDM), sobretudo en aplicaciones portátiles. En esta modulación, la amplitud de la señal de audio se codifica en la densidad o número de impulsos en función del tiempo. La señal de audio es efectivamente sobremuestreada a frecuencias de entre 1 MHz y 3 MHz con una resolución de 1 bit, efectuando el proceso de submuestreo, o diezmado, se incrementa la resolución y se reduce el ancho de banda de la señal en el mismo factor. Variando la frecuencia de trabajo, se varía el ancho de banda y por ende, el consumo del dispositivo. Esto último brinda una gran flexibilidad, útil en sistemas portátiles. Este tipo de modulación simplifica la electrónica incluida en los circuitos transmisores, aunque complejiza la recepción, requiriendo filtros de diezmado digitales. A pesar de esto, es posible recuperar la señal analógica utilizando un simple filtro pasa-bajos RC. Otra ventaja de este formato es su insensibilidad a las interferencias, lo cual permite rutear las señales por sistemas ruidosos. Los micrófonos MEMS están incorporando esta interfaz la cual simplifica las conexiones y elimina la necesidad de ADC y PGA de CODECs y DSPs. En la tabla 1 se comparan las interfaces anteriormente mencionadas (Lewis, 2012; Audio Precision, 2012).

2.3 Consideraciones de montaje e integración

Los micrófonos MEMS se fabrican con procesos CMOS estándares, por ende pueden incluirse en un mismo circuito integrado con la electrónica que los controla, utilizando los mismos tipos de encapsulados y técnicas de montaje. En general, se incluyen el diafragma y la electrónica en un único sustrato o en dos interconectados dentro del mismo encapsulado. Los primeros permiten el uso de encapsulados más pequeños, existiendo en el mercado micrófo-

nos de incluso 1 mm². Para la construcción del encapsulado se están utilizando materiales plásticos los cuales incrementan aún más su resistencia a golpes y caídas con respecto a micrófonos tradicionales.

Tabla 1. Tabla comparativa de interfaces digitales

Interfaz	I2S	PDM	TDM
Número de líneas	3	2	3
Número de canales	2	2	16
Frecuencia de Trabajo	512 kHz a 12,288 MHz	1 a 3 MHz	Hasta 25 MHz
Tamaño de los datos, en bits	16, 24, 32	1 a 32	16, 24, 32

Los micrófonos MEMS vienen en dos formatos: con el orificio para el ingreso del sonido hacia la membrana por encima del encapsulado (llamado top), o por debajo del mismo (bottom). En este segundo caso, se debe realizar una perforación en la placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés, Printed Circuit Board) que permita el ingreso del sonido al micrófono y, por ende, se formará una cavidad resonante entre el PCB, la soldadura y el micrófono. Se debe destacar que en función del tipo de montaje seleccionado y su ubicación en el PCB se pueden modificar las características de respuesta en frecuencia y direccionalidad del micrófono debido a reflexiones y resonancias que se puedan generar en el mismo. Estos fenómenos de resonancia están explicados mas en detalle en (Khenkin, 2010).

El camino desde el orificio de entrada del sonido en el gabinete del dispositivo hasta el punto de ingreso a la membrana del micrófono, conforma un circuito acústico que puede modificar la respuesta en frecuencia del micrófono. Debido a que la mayoría de los micrófonos MEMS tienen una respuesta en frecuencia plana y un tamaño reducido, en general la geometría de este camino acústico no va a afectar demasiado su respuesta. De $\lambda = c/f$, se obtiene que para 20 kHz la longitud de onda es de 17 mm, considerablemente mayor a las dimensiones del micrófono. Estos micrófonos son aptos para ser soldados directamente sobre PCB flexibles, lo cual permite reducir las dimensiones del camino acústico y mejorar la calidad el sonido. Finalmente, los fabricantes recomiendan que para los micrófonos de tipo bottom el orificio en el PCB tenga un diámetro mayor de 0,5 mm (Khenkin, 2010).

A pesar de lo anteriormente mencionado, en micrófonos de tipo bottom existe la posibilidad de que se produzca el efecto de un resonador de Helmholtz en la cavidad entre el orificio del micrófono y el PCB. Si bien este efecto podría llegar a ser útil en algunas aplicaciones, en general se buscará evitarlo. Para lograr esto, el espacio entre el micrófono y el orificio de acceso del sonido en el PCB o gabinete del dispositivo, deberá ser lo más pequeño posible o, si esto no es posible, el diámetro de la cavidad deberá ser cercano al del orificio externo.

Para el soldado de estos micrófonos, se utiliza el mismo procedimiento que para el resto de los CI. Cada fabricante provee la información necesaria para el armado de los estenciles y los perfiles de temperatura para el soldado. Los “pads” de soldadura presentan formas variadas y bastante diferentes a los de los demás CI, por ejemplo, en los micrófonos de tipo “bottom”, uno de los “pads” (en general la masa) rodea por completo al orificio para asegurar un camino correcto del sonido.

2.4 Aplicaciones principales de los micrófonos MEMS

Gracias a sus altas performances, pequeño volumen y costo y, sobretodo, su facilidad de integración, los micrófonos MEMS son ideales para los dispositivos electrónicos portátiles como tabletas digitales, notebooks y teléfonos celulares, mercados que constituyen la principal demanda de estos micrófonos. Inclusive, la mayoría de estos dispositivos ya incluyen 2 o más micrófonos, implementando funciones de “beamforming” para la reducción de ruido y claridad en las conversaciones. Por ejemplo, para las notebooks se fabrican módulos que incluyen la webcam y dos o más micrófonos MEMS que se colocan por encima de la pantalla para resolver las funciones de videoconferencia. En estas aplicaciones es crítico un bajo piso de ruido debido a que el uso de técnicas de procesamiento de arreglos de micrófonos como el “beamforming” suelen dar como resultado un sistema con un nivel de piso de ruido elevado, por lo tanto es crítico que cada micrófono en el arreglo tenga alta relación S/R. (Analog Devices, 2012).

Otro campo que se está expandiendo gracias a esta tecnología es el de los dispositivos de ayuda auditiva, tanto implantables como externos, aprovechando las características de reducido volumen y bajo consumo de este tipo de micrófonos. Además de la versatilidad del elemento transductor para obtener el sonido ya sea por las variaciones de presión o por las vibraciones conducidas por los huesos. (Ko et al., 2009).

Como fue mencionado anteriormente, una de las principales aplicaciones de los micrófonos MEMS es en arreglos. En particular, un arreglo de dos micrófonos se llama arreglo o sistema binaural. Los mismos son utilizados para emular la audición humana permitiendo realizar la adquisición del sonido en las mismas condiciones en que escucha un ser humano. A partir de estas grabaciones se pueden obtener diferentes claves o índices que dan información espacial acerca de las fuentes de sonido presentes en un ambiente, las mismas que utilizan los seres humanos.

3 Aplicaciones en la Línea EH

En la Línea de investigación en Ecolocación Humana y otros fenómenos de Percepción Acción sin claves visuales (Línea EH) del CINTRA UTN - UA CONICET se trabaja en la instrumentación de pruebas con sujetos para el estudio de diferentes conductas perceptuales acústicas. En las mismas se monitorean los movimientos, acciones y sonidos emitidos y percibidos por sujetos actuando en ambientes de laboratorio controlados. Debido a la necesidad de efectuar este tipo de pruebas en ambientes reales y complejos, surgió la necesidad de un sistema de adquisición de audio multicanal (con 2 o 3 micrófonos) de altas prestaciones, portátil y bajo costo en lo posible. Además, que ofrezca la posibilidad de montar cada micrófono en diferentes lugares, por ejemplo cerca del canal auditivo. Esto último implica directamente la necesidad de micrófonos de volumen reducido (Lunati et al., 2013).

Por otro lado, la Línea EH está trabajando en conjunto con el Grupo de investigación Robótica: Acción y Percepción (RAP) del Laboratorio de Análisis y Arquitectura de Sistemas, LAAS-CNRS, de Toulouse, Francia. Específicamente en trabajos sobre audición robótica activa y el desarrollo de sensores acústicos inteligentes y el planeamiento de la conducta de robots para la ejecución bio-inspirada de tareas de percepción acústica.

En primer lugar, se procedió a una primera caracterización de estos micrófonos utilizando la placa de desarrollo mencionada. De esta manera se buscó analizar el comportamiento de los micrófonos, su sensibilidad a ruidos y verificar sus principales especificaciones. Estas primeras mediciones serán descritas posteriormente.

A partir de los resultados obtenidos en estas primeras mediciones, se continuó trabajando en nuevos desarrollos de sistemas de interfaz hombre-máquina integrando micrófonos

MEMS en arreglos lineales. En particular, es de gran interés el desarrollo de un sistema de decodificación PDM a PCM de buenas prestaciones para aprovechar el máximo rendimiento de los micrófonos. Para lo mismo, se está trabajando en su implementación utilizando FPGA (del inglés Field Programmable Gate Array) mediante lenguajes de descripción de hardware. De esta manera se espera lograr un sistema de adquisición de audio multicanal para la utilización con arreglos de micrófonos MEMS.

3.1 Mediciones realizadas

El primer prototipo desarrollado para efectuar una primera caracterización de los micrófonos se basó en la placa STM32F4-Discovery de la marca ST la cual consta de un micrófono MEMS MP45DT02 (figura 1). Los primeros resultados obtenidos con este prototipo sirvieron para confirmar las buenas prestaciones que se pueden obtener con este tipo de transductores. A continuación se detallan los primeros resultados obtenidos presentados con más detalle en (Lunati et al., 2013).

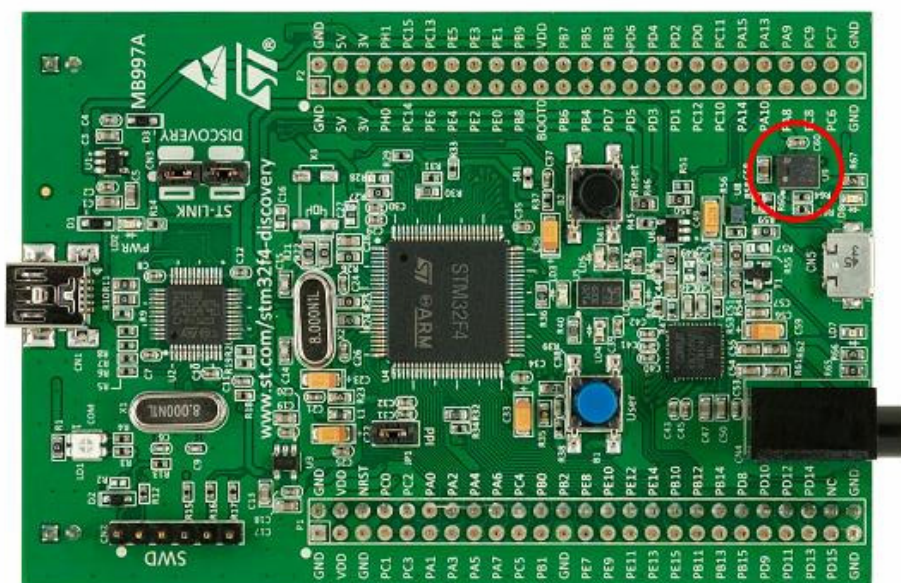


Figura 1. la placa de desarrollo STM32F4Discovery, se puede observar el micrófono MEMS resaltado con un círculo rojo

Las pruebas se realizaron en la cámara acondicionada acústicamente del CINTRA UTN – UA CONICET, bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura 21,3 °C
- Humedad 40,7 %
- Presión 96,5 kPa
- Nivel promedio de ruido: 4.1 dB (125 Hz - 8000 Hz)
- No se tomaron en cuenta los efectos de las reflexiones producidas por el PCB

El prototipo se situó a una distancia de 1,587 m de una fuente de sonido con respuesta en frecuencia plana y omnidireccional. Para las pruebas se utilizó un tono de 1 kHz, con un nivel de 80 dB para la medición de sensibilidad, posteriormente se varió la frecuencia para la medición de la curva de respuesta en frecuencia. En todo momento se compararon las mediciones de manera simultánea con las provistas por un micrófono de laboratorio (Brüel & Kjaer tipo 4179) conectado a una cadena de adquisición calibrada. Mediante este procedimiento se obtuvieron los siguientes datos:

- Sensibilidad: -96.8 dBV
- Respuesta en frecuencia:
 - 125 Hz 0.53 dB re 1 kHz
 - 250 Hz 1.63 dB re 1 kHz
 - 500 Hz 0.14 dB re 1 kHz
 - 1 kHz 0 dB re 1 kHz
 - 2 kHz -1.36 dB re 1 kHz
 - 4 kHz -6.74 dB re 1 kHz
- Ruido propio: 20.75 dB

Las mediciones anteriores corresponden a los resultados producidos por el filtro de diezmo empleado para la demodulación PDM. La frecuencia de muestreo se fijó a 16 kHz debido a limitaciones del sistema de adquisición. En consecuencia, los resultados también incluyen el comportamiento de este filtro, para poder realizar mediciones más precisas se debe mejorar el sistema de adquisición utilizado, mediante CI CODECs específicos o, como está previsto, la utilización de un sistema basado en FPGA. De todas maneras, se puede observar en los resultados obtenidos una respuesta casi plana en el rango 125 Hz - 2000 Hz, cualidad más que destacable en un sistema de adquisición de bajo costo y altamente integrado. Además, se obtuvo un muy bajo nivel de ruido propio de los micrófonos.

Debido a los inconvenientes anteriormente mencionados, se mejoró el sistema de adquisición mediante el uso de un nuevo filtro de diezmo permitiendo recuperar el audio en una frecuencia de hasta 48 kHz con una resolución de 16 bits. Utilizando este nuevo filtrado, se procedió a repetir las mediciones realizadas, esta vez llegando a caracterizar el micrófono en un rango completo de 16 Hz a 24 000 Hz.

Estas nuevas mediciones fueron realizadas utilizando la misma cadena de instrumentación y procedimiento anteriores, relevando la respuesta en frecuencia del micrófono vía la comparación con un micrófono de referencia. Se realizaron varias mediciones en diferentes momentos y puntos de la cámara para poder observar la estabilidad de la respuesta en frecuencia. En la figura 2 pueden verse los resultados obtenidos, en donde se observa una buena estabilidad en frecuencias bajas y medias entre los 50 Hz y 4000 Hz. Además, son notorios dos puntos de resonancia en 31,5 Hz y 6300 Hz los cuales se observan en la documentación técnica de muchos de los micrófonos MEMS comerciales. Fuera de la banda de frecuencias mencionadas se presenta una gran variabilidad de la respuesta en frecuencia.

Por último, en la figura 3 se presenta la misma respuesta en frecuencia promedio de la figura 3 en escalas de 1/3 y 1/24 de octava, en donde se pueden apreciar con más detalles los puntos de resonancia así como el comportamiento en altas frecuencias.

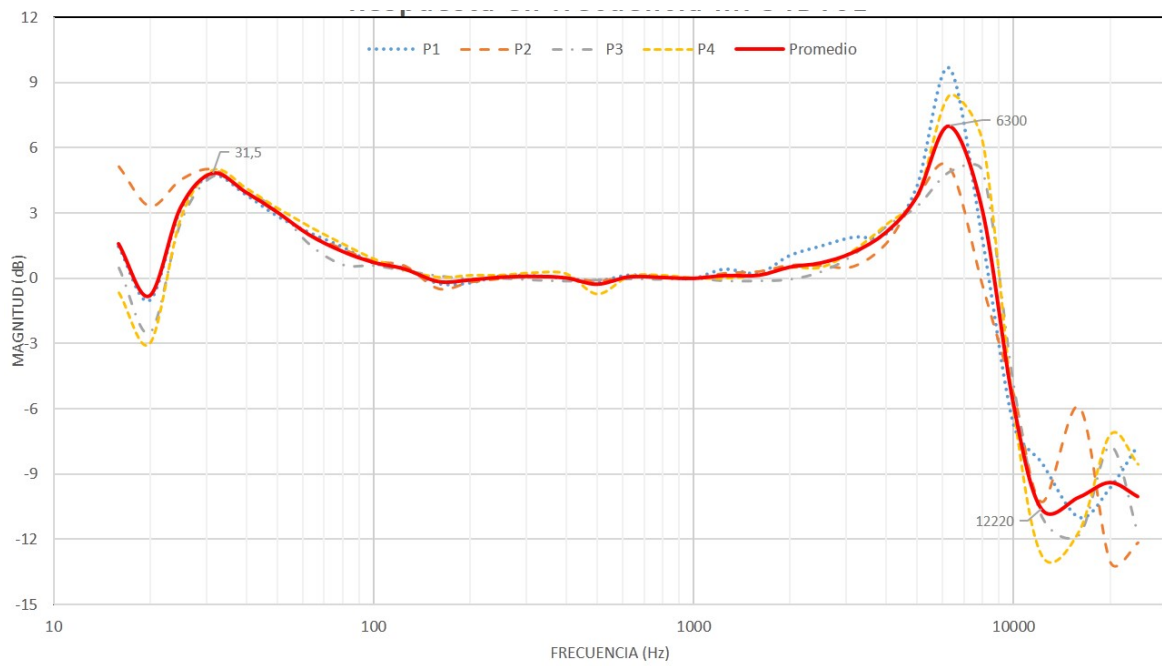


Figura 2: Respuesta en frecuencia del micrófono bajo test en 4 posiciones diferentes y el promedio de las mismas.

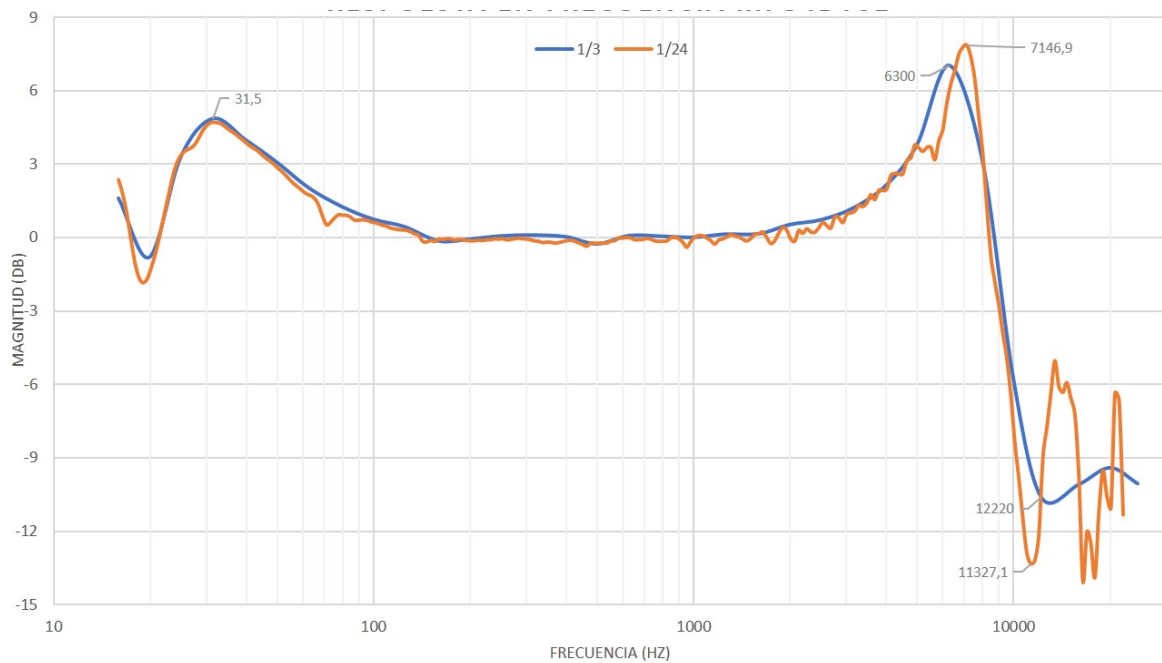


Figura 3. Respuesta en frecuencia del micrófono bajo test en escalas de 1/3 y 1/24 octavas.

4 Conclusión y trabajos futuros

Los micrófonos MEMS presentan numerosas ventajas principalmente en aplicaciones portátiles y de bajo costo, reuniendo excelentes prestaciones acústicas y electrónicas. Permiten el desarrollo de dispositivos de adquisición de audio de calidad cuasi profesional de manera muy sencilla. Además, facilitan la implementación de arreglos de micrófonos, permitiendo la implementación de funciones avanzadas de adquisición como beamforming, reducción de ruido, separación de fuentes sonoras, entre otras funciones de gran utilidad para mejorar las comunicaciones de voz e interacción hombre-máquina.

Se realizó un análisis inicial de un modelo en particular de micrófono MEMS, pudiéndose constatar, al menos de manera parcial, las especificaciones del fabricante. Además, se adquirió experiencia en el uso de los mismos y en los desafíos que involucran. El paso siguiente es de mejorar el sistema de toma de los datos suministrados por los micrófonos en pos de mejorar el ancho de banda y asegurar el sincronismo en la adquisición con cada micrófono. Para esto último, está prevista la utilización de un sistema basado en FPGA para la demodulación PDM de alta calidad y la adquisición síncrona de múltiples micrófonos.

5 Financiamiento

Este trabajo ha sido financiado a través de los PID UNC N° 05/P130 y PID UTN N° 1711.

Referencias

- Analog Devices I.(2012) Technical Article: Low Self Noise: “The First Step to High Performance MEMS Microphone Applications, MS-2348”.
- Audio Precision I.(2012). “Understanding PDM Digital Audio”.
- Khenkin A. (2010) Application note: “Recommendations for Mounting and Connecting Analog Devices, Inc.”, Bottom-Ported MEMS Microphones , AN-1003. Analog Devices, Inc.
- Ko W.H., Zhang R., Huang P., Guo J., Ye X., Young D.J., y Megerian C.A. (2009). “Studies of mems acoustic sensors as implantable microphones for totally implantable hearing-aid systems”. IEEE Trans. Biomed. Circuits and Systems, 3(5):277–285.
- Lewis J. (2011) Application note: “Microphone Specifications Explained”, AN-1112. Analog Devices, Inc.
- Lewis J.(2012) Technical Article: “Common Inter-IC Digital Interfaces for Audio Data Transfer”, MS-2275. Analog Devices, Inc.
- Lunati, V., Podlubne, A., González, F. M., Rosales, J. A., Urquiza Manzanelli, A. J., Ortiz Skarp, A. H., Arias, C. (2013), “Micrófonos MEMS: análisis y aplicaciones en audición Binaural”. Mecánica Computacional Vol XXXII, págs. 2935-2950
- Zwyssig E.P. (2009). “Digital Microphone Array - Design, Implementation and Speech Recognition Experiments”. Tesis de Doctorado, University of Edinburgh.