

MICRÓFONOS MEMS: ANÁLISIS Y APLICACIONES EN AUDICIÓN BINAURAL

**Valentín Lunati^a, Ariel Podlubne^a, Fernando Matías González^a, Juan Ariel Rosales^a,
Alan Javier Urquiza Manzanelli^a, Aldo Hugo Ortiz Skarp^a y Claudia Arias^{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, 50259@frc.utn.edu.ar; aripod@gmail.com, fbermejo@psyche.unc.edu.ar, carias@psyche.unc.edu.ar; <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba, Enfermera Gordillo esquina Enrique Barros, Ciudad Universitaria. Córdoba, Argentina. <http://www.psyche.unc.edu.ar>*

Palabras Clave: Micrófonos MEMS, adquisición binaural, especificaciones acústicas

Resumen. El perfeccionamiento y abaratamiento de los costos de las tecnologías de fabricación de los Sistemas Microelectromecánicos o MEMS ha permitido el desarrollo de micrófonos MEMS de excelentes performances llegando incluso a superar aquellas de los micrófonos profesionales estándares, posibilitando además, 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 especificaciones acústicas. Por otro lado, al estar desarrollados con las mismas técnicas de fabricación que el resto de los componentes electrónicos y el uso de interfaces más inmunes al ruido, simplifica los procesos de desarrollo y montaje de los dispositivos electrónicos que los integran. Uno de los usos más difundidos de estos micrófonos es en arreglos de dos o más para el control de ruido y reconocimiento de voz. Igualmente, se está aplicando esta tecnología en robótica, desarrollándose sistemas de percepción auditiva bio-inspirados de bajo costo y altas prestaciones. 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. También se describe el procedimiento de validación de un sistema portátil de adquisición binaural desarrollado para su aplicación en pruebas de localización y reconocimiento auditivo de objetos sin claves visuales en participantes ciegos y con visión normal. Finalmente, se presentan lineamientos preliminares para la aplicación de este sistema en 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 independizándose 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. También se describe el procedimiento de validación de un sistema portátil de adquisición binaural desarrollado para su aplicación en pruebas de localización y reconocimiento auditivo de objetos sin claves visuales en participantes ciegos y con visión normal. Finalmente, se presentan lineamientos preliminares para la aplicación de este sistema en audición robótica.

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 substrato 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) En la figura 1 se puede observar un diagrama del principio de funcionamiento descripto. A estos circuitos integrados (CI) construidos sobre un substrato 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 diferente debido principalmente a que estos micrófonos están compuestos por una

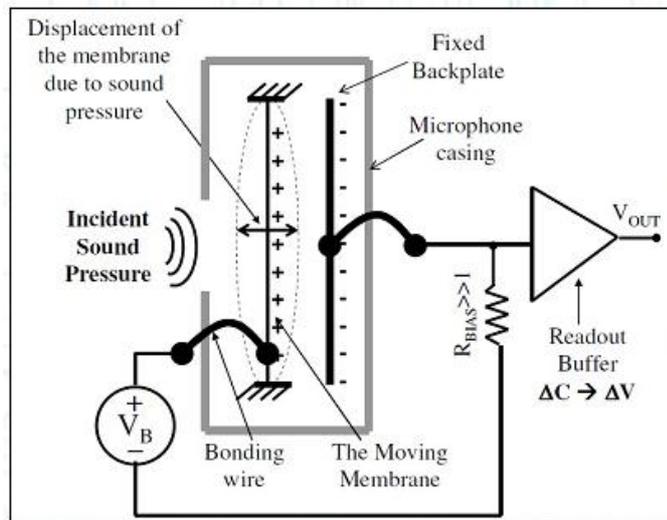


Figura 1: Diagrama explicativo del principio de funcionamiento de un micrófono MEMS.

parte acústica (transductor acústico-eléctrico) y otra electrónica. Posteriormente se describirán las principales especificaciones de estos micrófonos y como 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 1kHz a 94dB SPL). La sensibilidad en decibeles 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, decibeles referenciados a la salida a fondo de escala, y se obtiene a partir de la siguiente relación:

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

en donde $Sensibilidad_{\%FS}$ es la sensibilidad porcentual con respecto al valor de fondo de escala y $Salida_{REF}$ es el nivel de salida digital a fondo de escala. (Lewis, 2011)

2.1.2. Directividad:

La directividad describe el patrón en el cual la sensibilidad del micrófono varía cuando la fuente de sonido cambia de posición en el espacio. Los micrófonos MEMS en general son omnidireccionales, es decir, tienen la misma sensibilidad a 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 por el micrófono y la electrónica incorporada en el encapsulado del micrófono MEMS. En decibeles, la S/N es la diferencia entre el nivel de ruido y la señal de referencia estándar de 1kHz a 94dB SPL. La especificación es típicamente para un ancho de banda de 20kHz 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 alrededor de 58 a 60dB, pero en la actualidad la performance de estos está incrementando drásticamente, llegando a S/R de 65dB (29 dBA EIN). En comparación con los micrófonos de condensador electret, se puede decir que a igualdad de SNR, los micrófonos MEMS son mucho más pequeños y que estos últimos mantienen su respuesta en frecuencia mejor con 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 SPL, por lo tanto, el rango dinámico de un micrófono MEMS es su $S/N + 26dB$ ($120dB - 94dB = 26dB$).

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 dBSPL. EIN puede derivarse del Rango Dinámico o de la S/R:

$$\begin{aligned} \text{EIN} &= \text{máximo nivel de entrada acústica} - \text{Rango Dinámico} \\ \text{EIN} &= 94\text{dB} - \text{S/R} \end{aligned}$$

2.1.6. Respuesta en Frecuencia:

La respuesta en frecuencia de un micrófono describe la variación de su sensibilidad a lo largo de un espectro de frecuencias. Las frecuencias de corte inferior y superior son los puntos en los cuales la sensibilidad cae 3 dB con respecto a la de 1kHz (normalizada a 0dB). La respuesta en frecuencia de un micrófono MEMS típico es de 100Hz a 15kHz. La especificación de la respuesta en frecuencia incluye los valores máximos y mínimos de picos dentro de una banda dada tomando como referencia los 0dB a 1kHz. 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:

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:

$$THD = \frac{\sum_{x=1}^5 \text{Potencia}(f_{armónica_x})}{\text{Potencia}(f_{fundamental})}$$

En los micrófonos MEMS, la THD se calcula 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. La señal típica de entrada para esta medición es de 105dB SPL, 11dB por encima del valor de referencia SPL de 94dB. 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 10dB del nivel de señal de entrada. Por lo tanto, THD menor a 3Rechazo de Fuente de Alimentación (PSR): Es la medida de la habilidad del micrófono para rechazar el ruido presente en los pines de la fuente de alimentación de la señal de salida. Se mide acoplando una señal (onda cuadrada) de 10mV pico a pico a 217Hz en la VDD del micrófono. La especificación de PSR es la medida de la fuerza de la señal a 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.

2.1.8. 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 SPL pico, no en rms.(Lewis, 2011)

2.2. Tipos de micrófonos

Como fue mencionado 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. En la tabla 1 se presentan algunos modelos comerciales de los principales fabricantes de micrófonos MEMS y se presentan sus principales características.

Especificación:	AKU240	MP45DT02	MP34DT01	ADMP510	WM7125E
SNR	63dB	61dB	63dB	65dB	65dB
Interface	Digital	Digital	Digital	Analógico	Analógico
Sensibilidad	-26 dBFS	-26 dBFS	-26 dBFS	-38 dBFS	-38 dBFS
Resp. en frec.(Hz)	50-14000	20-10000	20-20000	60-2000	62-15000
Tamaño (mm)	(3x4x1)	(4.7x3.7x1.2)	(3x4x1)	(3.3x2.5x0.8)	(3.7x2.9x1.1)
Lin max	116 dB SPL	120 dB SPL	120 dB SPL	124 dB SPL	126 dB SPL

Tabla 1: Tabla comparativa de interfaces digitales usadas en micrófonos MEMS

2.3. Encapsulados y montaje

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 substrato o en dos interconectados dentro del mismo encapsulado. Los primeros permiten el uso de encapsulados más pequeños, existiendo en el mercado micrófonos de incluso

$1mm^2$. 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. 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 el PCB 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. 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 $\sim 17mm$, 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 del sonido. Finalmente, los fabricantes recomiendan que para los micrófonos de tipo bottom el orificio en el PCB tenga un diámetro mayor de 0.25mm.(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. Interfaces utilizadas

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

2.4.1. Interfaces analógicas

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, estar 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 dispositivos que aparecen en el mercado implementan algún tipo de interfaz digital como las que se describirán posteriormente.

2.4.2. Interfaces de audio 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 independientes se utilizan 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), sobretodo 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 sobre muestreada a frecuencias de entre 1 y 3 MHz con una resolución de 1 bit, efectuando el proceso de sub muestreo, o decimación, se incrementa la resolución y se reduce el ancho de banda de la señal en el mismo factor. Variando la frecuencia de trabajo, se varia 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 decimación 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 2 se comparan las interfaces anteriormente mencionadas. (Lewis, 2012; Audio Precision, 2012)

Interfaz	I2S	PDM	TDM
Nº líneas:	3	2	3
Canales:	2	2	16
Frecuencia de trabajo:	512 kHz a 12.288MHz	1 a 3MHz	Hasta 25MHz
Ancho de palabra:	16, 24, 32	1 a 32	16, 24, 32

Tabla 2: Tabla comparativa de interfaces digitales usadas en micrófonos MEMS

2.5. Aplicaciones principales

Las aplicaciones en donde se pueden aprovechar la alta performance de los micrófonos MEMS es en situaciones en donde la fuente de sonido está alejada del mismo. Por ejemplo en video conferencias, audio profesional, sistemas industriales y sensores acústicos entre otros. Un bajo piso de ruido es crítico en aplicaciones de beamforming, los cuales suelen dar como resultado un sistema con un nivel de piso de ruido elevado, comparado con un solo micrófono en un arreglo, por lo tanto, es crítico que cada micrófono en el arreglo tenga alta relación S/R. (Analog Devices (2012)

Además, gracias a sus altas performances, pequeño volumen y costo y, sobretodo, su facilidad de integración, 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.

Por último, otro campo que se está expandiendo gracias a esta tecnología es el de los dispositivos de ayuda auditiva, tanto en implantes 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)

3. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN BINAURAL

Como fue mencionado anteriormente, una de las principales aplicaciones de los micrófonos MEMS es en arreglos. En particular, un arreglo de dos micrófonos es llamado arreglo o sistema binaural. Los mismos son utilizados para emular la audición humana permitiendo realizar grabaciones de audio 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. A continuación se resumen brevemente los índices binaurales principales. (Persson, 2013)

3.1. Índices Binaurales:

ILD (Interaural Level Difference)

Es la propiedad que posee el sistema auditivo para poder localizar la dirección de un sonido mediante la diferencia de niveles de presión sonora que llegan a cada oído del oyente, o micrófono en sistemas electrónicos. ILD depende de diversos factores como frecuencia, ángulo de incidencia, función de transferencia de la cabeza, entre otros.

ITD (Interaural Time Difference)

Es la diferencia de tiempo con que el sonido llega a cada oído desde la fuente sonora desplazada en el plano mediano. El ITD tiene relevancia en dos maneras diferentes dependiendo de la frecuencia del sonido. Para frecuencias hasta 800Hz los retardos de fase son muy importantes pero para frecuencias superiores a 1.5KHz los retardos de grupos son de mayor relevancia. En el rango intermedio de .8-1.5KHz son utilizados también los retardos de grupo.

BMLD (Binaural Masking Level Difference)

Es la capacidad de disminuir el umbral de enmascaramiento al escuchar con ambos oídos. O sea de detectar una señal en presencia de ruido cuando la fase y el nivel de la señal en las orejas no son las mismas. Se puede entender como una atenuación del efecto de enmascaramiento si la señal y enmascaramiento provienen de diferentes posiciones del espacio.

3.2. Localización del sonido

El humano es capaz de discriminar de qué posición del espacio proviene una fuente sonora. Para determinar la posición en el plano horizontal se basa en la evaluación de los índices interaurales anteriormente mencionados, no así para hacerlo sobre el plano mediano, para esto el cerebro filtra el sonido según la distorsión en la frecuencia causada por los hombros la cabeza y la oreja misma, la cual depende de la dirección del sonido. Este proceso es bastante menos preciso que el utilizado para determinar la posición horizontal de la fuente sonora. La audición binaural es el proceso desde el momento que el sonido arriba al oído hasta la sensación de percepción.

3.3. Tecnologías de adquisición de sonido binaural

Existen dos tipos sistemas para realizar las grabaciones binaurales, estos son con un sistema torso-cabeza artificial y en el otro los micrófonos son situados cerca del canal auditivo. Las principales diferencias y ventajas entre ambos métodos son que con el primero se pueden realizar mediciones totalmente repetible debido a que el sistema torso-cabeza representa a un promedio de características del cuerpo humano y en él se sitúan los micrófonos en el canal auditivo del maniquí, el segundo sistemas tiene como contrapartida la ventaja de ser fácilmente transportable, manejable y barato aunque las mediciones no son siempre repetibles debido al sujeto que realice la prueba, en estos sistemas los micrófonos son situados cerca del canal auditivo por ende con el primer método se realizan mediciones más fieles. Algunos ejemplos tecnologías utilizadas pueden ser:

ROLAND - CS-10EM

Ofrece un combinado monitoreo in-ear y la grabación binaural. Utiliza auriculares-micrófono para capturar lo que se oye. Representado en la figura 2.



Figura 2: Sistema de monitoreo in-ear Roland CS-10EM.

Características principales:

- Micrófonos Electret de condensador omnidireccionales
- Respuesta en frecuencia 20 Hz to 20,000 Hz
- Sensibilidad -40 dB 1V/Pa

- S/N 60 dB
- Impedancia 2.2 k Ω
- Auriculares Dinámicos
- Sensibilidad 102 dB/1mW, 500 Hz
- Respuesta en frecuencia 15 Hz a 22,000 Hz
- Impedancia 16 Ω

Brüel & Kjær - Micrófonos binaurales- Tipo 4101

La parte superior del micrófono Binaural comprende dos tubos de acero inoxidable de 2 mm. Un cable coaxial en miniatura en una trenza Microdot conecta a los conectores BNC. Las cápsulas de micrófono son de condensador en miniatura de DPA. Están montados en una cápsula enchapada en oro que es resistente a la humedad. Los micrófonos se seleccionan basándose en la coincidencia de sus respuestas de frecuencia de funcionamiento en el canal auditivo abierto de la persona de prueba. El micrófono binaural se calibra con el simulador de cabeza y torso 4128, que también tiene un canal auditivo abierto. Representado en la figura 3. (Kjær, 2007)



Figura 3: Microfono binaural B&K 4101.

Características principales:

- Nivel de ruido propio: 23 dBA
- Nivel maximo de entrada: 134 dBSPL
- Respuesta en frecuencia: 20 Hz a 8 kHz, \pm 2 dB re 1 kHz
- Sensibilidad: 20 mV/Pa \pm 3 dB a 1 kHz

Brüel & Kjær – Simulador de Cabeza y torso – Tipo 4128

El simulador de Cabeza y Torso (HATS por sus siglas en inglés) Tipo 4128C es un maniquí con simuladores para los oídos y la boca que proporcionan una reproducción realista de las propiedades acústicas de un promedio de cabeza y torso humano adulto. Representado en la figura 4.



Figura 4: Simulador de cabeza y torso B&K 4128.

Características principales:

- Cumple con la Rec. UIT-T. P.58 y ANSI S3.36-1985
- Cumple con las especificaciones de la norma IEC 60318-7 acústicas
- Simulador de boca muy representativa con protección de sobrecarga
- El oído del Tipo 4158C cumple UIT-T P.57 y IEC60318-4
- Ángulo del cuello ajustable para mediciones de headsets realistas

Head Acoustic - BHS II Binaural Headset

El auricular binaural BHS II es una unidad de auriculares / micrófono que se puede utilizar para grabación y reproducción de archivos de sonido binaural. Representado en la figura 5. (Acoustics, 2012)

Características principales:

- Sensibilidad de entrada puede ajustarse entre 94dB y 10dB-134dB en
- Respuesta en frecuencia: 20 – 20000 Hz
- Ruido equivalente a la entrada: 27 dBA
- Nivel de presión sonora máximo: 130 dBSPL



Figura 5: BHS II Binaural Headset.

4. APLICACIONES EN LA LÍNEA EH Y EN AUDICIÓN ROBÓTICA

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. 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. A partir de estos trabajos, se decidió la construcción de un nuevo sensor acústico basado en micrófonos de tecnología MEMS, en particular se eligió el modelo M34DT01 de la empresa STMicroelectronics, comandado por la placa de desarrollo STM32F4Discovery de la misma firma. El objetivo de este sensor acústico en desarrollo es de obtener un sensor de bajo costo y altas prestaciones e inmunidad al ruido y asimismo, utilizar micrófonos de reducido tamaño, en este caso de $4 \times 4 \text{ mm}^2$.

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. Además, se colaboró en el diseño de un montaje especial para estos micrófonos, sobre un PCB de 1 cm^2 con el cual se pudieron realizar mediciones más confiables y con mayor libertad en cuanto a los montajes posibles. Este mismo desarrollo se está utilizando tanto en pruebas con sujetos en la Línea EH como con robots en el grupo RAP.

4.1. Sistema desarrollado y mediciones realizadas

El prototipo desarrollado para efectuar una primera caracterización de los micrófonos se basa en la placa STM32F4-Discovery de la marca ST, mostrada en la figura 7 la cual consta de un micrófono MEMS MP45DT02, indicado con un círculo rojo en la figura 7 y en la figura 6 se muestra en detalle. Para la adquisición de audio binaural se implementó una vincha que posee dos de las placas anteriormente mencionadas colocadas para que el micrófono se sitúe a la altura del canal auditivo, la distancia horizontal entre los micrófonos MEMS es de 18 cm. Esta se colocó en el simulador de torso y cabeza Tipo 4128 de la marca Brüel & Kjær. (STMicroelectronics, 2012b, 2013, 2012a) (STMicroelectronics, 2012a)

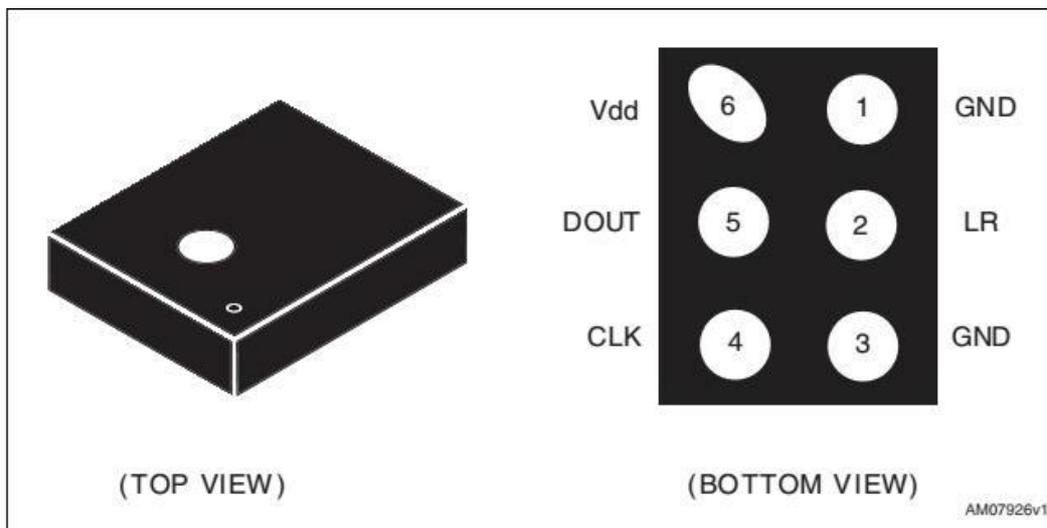


Figura 6: Encapsulado y conexiones del micrófono MP45DT02

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 SPL (125 – 8000 Hz)

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 con las provistas por un micrófono de laboratorio (Brüel & Kjær tipo 4179) conectado a una cadena de adquisición calibrada. Mediante este procedimiento se obtuvieron los siguientes datos:

- Sensibilidad: -96.8 dBV 1V/Pa
- Respuesta en frecuencia:

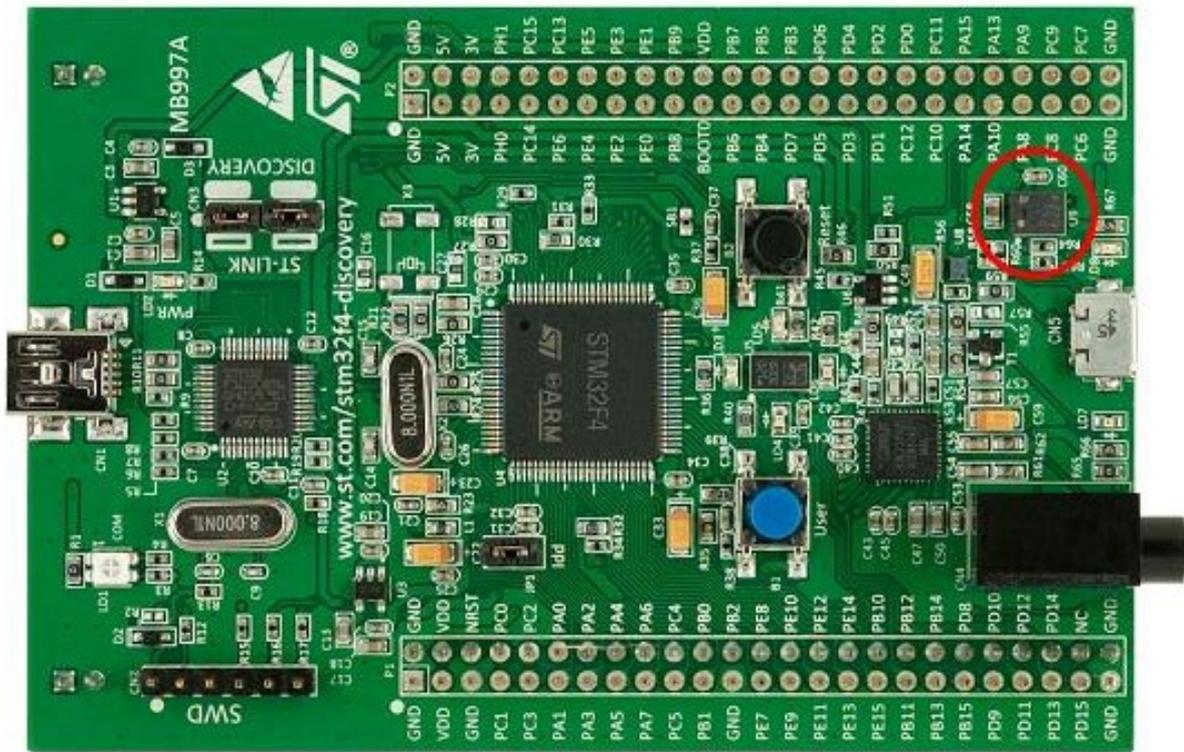


Figura 7: Placa de desarrollo STM32F4-Discovery

- 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 SPL

Las mediciones anteriores corresponden a los resultados otorgados por el filtro de decimación 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 – 2000 Hz, cualidad más que destacable en un sistema de adquisición de bajo costo y altamente integrado. En la tabla de la figura 8

se puede observar la máscara de la respuesta en frecuencia especificada por el fabricante del micrófono bajo test. Además, se obtuvo un muy bajo nivel de ruido propio de los micrófonos.

Table 6. Frequency response mask for digital microphones

Frequency / Hz ⁽¹⁾	Lower limit	Upper limit	Unit
20...100	-5	+5	dBr 1kHz
100...8000	-2	+2	dBr 1kHz
8000...10000	-5	+5	dBr 1kHz

1. At T = 20 °C and acoustic stimulus = 1 Pa (94 dB SPL)

Figura 8: Respuesta en frecuencia del micrófono MP45DT02.

5. 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 casi profesional de manera muy sencilla. Además, facilitan la construcción de arreglos de micrófonos, permitiendo la implementación de funciones avanzadas de adquisición como beamforming, reducción de ruido, separación de fuentes sonoras, entre otras, de gran utilidad para mejorar las comunicaciones de voz e interacción hombre-máquina. El desarrollo de un sistema de adquisición binaural basado en esta tecnología presenta la ventaja de disponer de micrófonos de un reducido tamaño que pueden colocarse con libertad en diferentes superficies (por ejemplo cerca del canal auditivo de un sujeto, o sobre una cabeza artificial) sin perturbar notoriamente la función de transferencia de las mismas. 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.

FINANCIAMIENTO

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

REFERENCIAS

- Acoustics H. *Data sheet : BHS II (Code 3322): Binaural headset for aurally accurate recording and (with SQuadriga II) playback*, 2012.
- Analog Devices I. *Technical Article: Low Self Noise: The First Step to High Performance MEMS Microphone Applications, MS-2348*, 2012.
- Audio Precision I. *Understanding PDM Digital Audio*, 2012.
- Khenkin A. *Application note: Recommendations for Mounting and Connecting Analog Devices, Inc., Bottom-Ported MEMS Microphones , AN-1003*. Analog Devices, Inc., 2010.

- Kjær B.. *Binaural Microphone - Type 4101 and Binaural Microphone with TEDS - Type 4101-A*, 2007.
- Ko W.H., Zhang R., Huang P., Guo J., Ye X., Young D.J., y Megerian C.A. Studies of mems acoustic sensors as implantable microphones for totally implantable hearing-aid systems. *IEEE Trans. Biomed. Circuits and Systems*, 3(5):277–285, 2009.
- Lewis J. *Application note: Microphone Specifications Explained, AN-1112*. Analog Devices, Inc., 2011.
- Lewis J. *Technical Article: Common Inter-IC Digital Interfaces for Audio Data Transfer, MS-2275*. Analog Devices, Inc., 2012.
- Persson M. *Simplified Binaural Measurement Systems for Interior Noise Evaluation of Truck Vehicle Compartments*. Tesis de Maestría, Chalmers University of Technology, 2013.
- STMicroelectronics. *Data sheet: MEMS audio sensor omnidirectional digital microphone, MP45DT02 Data sheet*, 2012a.
- STMicroelectronics. *User Manual: STM32F4DISCOVERY STM32F4 high-performance discovery board, UM1472*, 2012b.
- STMicroelectronics. *Application note: Microphone coupon boards STEVAL-MKII29Vx based on the MP45DT02, MP34DB01, and MP34DT01, AN4184*, 2013.
- Zwyssig E.P. *Digital Microphone Array - Design, Implementation and Speech Recognition Experiments*. Tesis de Doctorado, University of Edinburgh, 2009.