

VALIDACION ACÚSTICA DE UN PROTOTIPO DE CENTRAL REMOTA DE MONITOREO DE RUIDO AMBIENTAL

ACOUSTIC VALIDATION OF A PROTOTYPE OF REMOTE ENVIRONMENTAL NOISE MONITORING STATION

**Raúl A. Bodoira^a, Jorge A. Pérez Villalobo^{a,b}, Horacio H. Contrera^a, Valentín Lunati^a y
Aldo H. Ortiz Skarp^a**

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica, CINTRA, Unidad Asociada del CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, X5016ZAA Córdoba, Argentina, jorgeperezvillalobo@gmail.com, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, X5016ZAA Córdoba, Argentina, <http://www.institucional.frc.utn.edu.ar/civil/>*

Palabras clave: contaminación acústica, central de monitoreo de ruido, MEMS, FPGA

Resumen. Las mediciones de niveles de presión sonora realizadas para evaluar los niveles de ruido ambiente requieren la presencia "in situ" de un medidor de nivel sonoro (MNS) y operador para cada punto de medición. En algunos casos estas mediciones se realizan periódicamente y en los mismos puntos, resultando más eficiente contar con MNS autónomos y controlables remotamente. El elevado costo de este tipo de instrumentos y la escasa disponibilidad local, ha motivado el desarrollo de un primer prototipo de una central de monitoreo de ruido ambiental con prestaciones similares a un MNS Clase 2. El prototipo desarrollado utiliza micrófonos digitales de tipo MEMS (Microelectromechanical systems) como elemento transductor y un FPGA (Field-Programmable Gate Array) para la adquisición del sonido y cálculo de niveles de ruido. En esta primera etapa del proyecto se analiza: la respuesta en frecuencia de la cadena de medición y el desempeño de los filtros digitales de octavas.

Keywords: noise pollution, noise monitoring station, MEMS, FPGA

Abstract. The measurements of sound pressure levels made to evaluate ambient noise levels require the presence "in situ" of a sound level meter (SLM) and operator for each measurement point. In some cases, measurements are made periodically at the same points, so it is more efficient to use autonomous and remotely controllable meters. The high cost of this type of instruments and the difficulty in disposing of them, motivates the development of a first prototype of an autonomous and low cost noise monitoring station for measuring environmental noise with features similar to a sound level meter Class 2. The developed prototype includes digital microphones of MEMS technology (Microelectromechanical systems) as a transducer element and an FPGA (Field-Programmable Gate Array), for the acquisition of sound and calculation of noise levels. In this first stage of the project, the following is analyzed: the frequency response and stability of the microphone, the performance of the digital weighting filters and in octave bands implemented.

1 INTRODUCCIÓN

La presencia de niveles elevados de ruido, constituye una problemática actual en grandes centros poblados. Son diversas las fuentes que contribuyen al ruido urbano (tráfico vehicular, obras en construcción, entre otras) y resulta de vital importancia su medición si se desea actuar sobre este tipo de contaminación (Zannin et al. 2001). Los efectos perjudiciales en seres humanos, producto de la exposición a niveles excesivos de ruido, han sido ampliamente investigados (Chowdhury 2016). Estos pueden ser categorizados como efectos fisiológicos, como la pérdida de la capacidad auditiva, el desarrollo de afecciones al sistema cardiovascular (Basner et al. 2014) entre otros, y psicológicos, como el incremento del estrés, la irritabilidad, la disminución de la capacidad cognitiva o trastornos en el sueño (Evans et al. 1995).

Las mediciones de los niveles de ruido se han de realizar a partir de un medidor de nivel sonoro (MNS) y un operador. Dado que en muchos casos esta medición se lleva a cabo de forma reiterada y en un mismo punto de muestreo, resulta conveniente el uso de instrumentos de medición autónomos y controlables remotamente. Este tipo de instrumento, comercialmente denominado central remota de monitoreo de ruido, es de elevado costo y escasa disponibilidad en el mercado local (Bodoira et al. 2018; Sotirakopoulos 2016).

En el presente trabajo se evalúa el desarrollo de un prototipo preliminar de una central de monitoreo de ruido. Para la implementación de la misma ha primado el bajo costo cuidando de mantener una buena performance en cuanto a la exactitud de la medida y respuesta en frecuencia del sistema, intentando obtener características similares a un MNS Clase 2 (IEC 61672-1). Se ha utilizado como elemento transductor un micrófono MEMS, con el fin de evaluar esta nueva tecnología y la viabilidad de su uso en instrumentos de cierta precisión. El procesamiento y cálculo de los niveles sonoros se realizó sobre una plataforma electrónica basada en un SoC (System On Chip), la cual combina un microcontrolador y un dispositivo lógico programable.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los niveles de ruido son adquiridos por el micrófono y luego procesados para el cálculo del nivel sonoro continuo equivalente (Leq). El sistema propuesto tiene la capacidad de medir el nivel sonoro equivalente ponderado A ($LAeq$) o C ($LCeq$) y sin ponderación ($LZeq$), así como niveles sonoros por bandas de 1/1 octavas (análisis espectral). En Figura 1 puede verse un diagrama esquemático del sistema de medición.

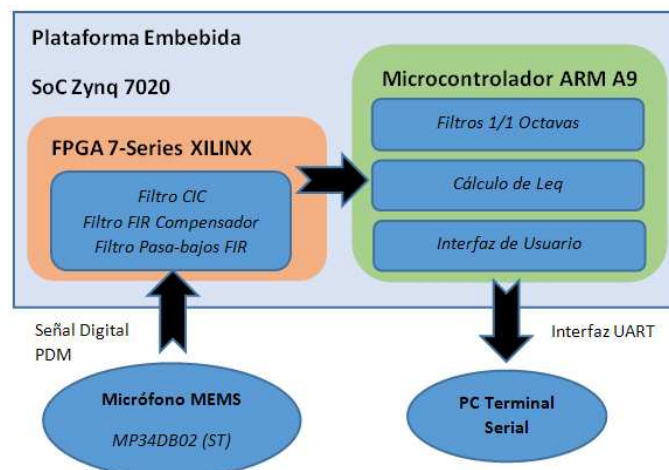


Figura 1: Diagrama del sistema de medición.

2.1 Micrófono

El transductor utilizado es un micrófono MEMS MP34DB02 de la firma ST Microelectronics, [Figura 2](#). Sus principales características son: omnidireccional, con polarización simple, nivel máximo de saturación de 120 dB SPL, sensibilidad -26 dBFS.



Figura 2: Micrófono MP34DB02 utilizado.

Los sensores de tecnología MEMS presentan la ventaja de ser dispositivos económicos comparados a sensores tradicionales, de bajo consumo energético y de prestaciones suficientes en gran parte de sus aplicaciones ([Lunati et al. 2013](#); [Barham 2010](#)).

Un micrófono tipo MEMS, posee una salida digital, con modulación de datos PDM (modulación por densidad de pulsos), la cual brinda una interfaz de conexión robusta, de modo tal de prevenir la incidencia de perturbaciones en los datos medidos o poseer mayor inmunidad al ruido eléctrico propio del sistema. Los dos parámetros claves al seleccionar el micrófono son: la relación señal-ruido (SNR) y el punto de sobrecarga acústica (AOP) ([ST 2017](#)).

El micrófono es de tipo capacitivo. Se compone de dos membranas de material semiconductor, una de ellas fija, y la restante vibra con la presión sonora incidente ([González et al. 2015](#)). La respuesta en frecuencia del micrófono debe ser lo más plana posible. Sin embargo estos micrófonos presentan un pico de resonancia en alta frecuencia, producto del efecto Helmholtz ([ST 2014](#)).

En la modulación PDM la información está contenida en la mayor o menor concentración de los pulsos ([ST 2017](#)). Existirá una dependencia entre la frecuencia de reloj de la interfaz PDM y el ancho de banda de audio que es capaz de procesarse, ver Ecuación (1), la que queda determinada mediante la relación de sobremuestreo (OSR, Over Sampled Ratio).

$$BW = \frac{f_{clock}}{2 OSR} \quad (1)$$

Donde BW es el ancho de banda de audio a considerarse, f_{clock} es la frecuencia de reloj de la interfaz PDM y OSR es la relación de sobremuestreo. Para un OSR de 64, y considerando una frecuencia de muestreo de 48 kHz, la frecuencia de reloj alcanza fácilmente los 2,5 MHz.

Para poder procesarse los niveles medidos, debe convertirse la señal PDM a una PCM (modulación codificada en pulsos) ([Bodoira et al. 2018](#)). La conversión PDM-PCM se realiza mediante una operación de decimación o filtrado. El filtro requerido se conoce como Digital Down Converter (DDC), el cual implica tres etapas en cascada: una primera de tipo CIC (Filtro Cascada Integrador-Comb) antialias con factor de diezmado 1:13; la siguiente mediante un filtro compensador y por último un pasa-bajos de rizado uniforme (equiripple), ambos con un diezmado 1:2 ([Todorović et al. 2017](#); [Intel 2007](#)). El bloque DDC de filtrado ha

sido implementado en el hardware reconfigurable de la placa de desarrollo empleada.

2.2 Plataforma electrónica de procesamiento

El sistema propuesto cumple dos funciones fundamentales:

1. La lectura de los niveles sonoros instantáneos captados por el micrófono y su almacenamiento en memoria.
2. El procesamiento de cálculo de los diferentes descriptores de ruido. A partir de los niveles sonoros instantáneos, se obtiene el nivel equivalente (Leq). Siendo opcional aplicar ponderación A o C. Además se pueden aplicar filtros por bandas de 1/1 octavas.

La plataforma de desarrollo utilizada es una Z-Turn Board de MYiR, ver [Figura 3](#). Está basada en un SoC de Xilinx, el cual incorpora un microcontrolador ARM A9 junto con un dispositivo lógico programable FPGA (Artix 7 Xilinx).

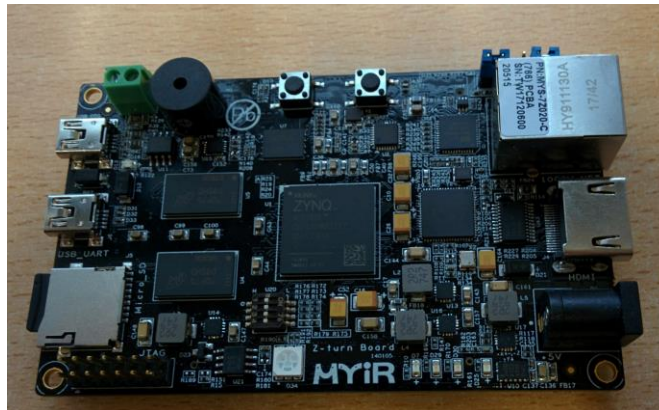


Figura 3: Plataforma embebida MYiR Z-Turn.

3 MEDICIÓN DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA

Un descriptor sonoro, es un parámetro que sirve para cuantificar diferentes aspectos o características de un ruido, el cual en la mayoría de los casos debe corresponderse con la percepción del oyente.

3.1 Nivel sonoro continuo equivalente Leq

El más utilizado de ellos es el nivel sonoro continuo equivalente Leq , el cual corresponde a un nivel constante que, en términos de energía acústica, es equivalente al sonido fluctuante medido en una ventana de tiempo T . Es decir, el Leq provee el mismo contenido energético que el sonido variable durante el tiempo de medida. La ecuación (2) corresponde a la expresión analítica del valor Leq , para un tiempo de medida T , del nivel de presión sonora instantánea p .

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) dt \right\} \quad (2)$$

La presión p_0 corresponde a la presión de referencia de 20 μ Pa. El uso del Leq para cuantificar el nivel de ruido, no resulta intuitivo perceptualmente, dado que el oído humano no presenta un comportamiento plano en frecuencia sino que posee una sensibilidad menor en los extremos del rango auditivo, es decir, en baja y alta frecuencia. Por esto, es común el uso de

los niveles equivalentes utilizando curvas de ponderación que ajustan los niveles medidos a la sensación perceptual experimentada por el oyente.

4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS FILTROS

4.1 Selección de la topología

En esta primera etapa, se han diseñado e implementado los siguientes filtros: filtro de ponderación A, filtro de ponderación C y filtro por bandas de 1/1 octavas.

Estos filtros son desarrollados en software, como filtros digitales IIR (Infinite Impulse Response). La tarea de diseño de un filtro IIR consiste en obtener –a partir de las especificaciones requeridas del filtro– un set de coeficientes que varían según la estructura o topología elegida. En términos matemáticos la respuesta en frecuencia del filtro no se ve alterada por la selección de una u otra estructura, solo provee distintas ventajas de implementación en software o hardware que reduce la complejidad del diseño y optimiza el tiempo de respuesta del sistema.

El filtro se compone de una cascada de bloques bicuadrados, donde cada bloque representa un filtro de segundo orden, el cual contendrá un conjunto de seis coeficientes que definen su comportamiento en frecuencia. En la ecuación (3) se presenta la función de transferencia de una sección bicuadrada IIR.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (3)$$

Los coeficientes a_i y b_i , son ganancias que multiplican las muestras retardadas de la señal de salida y de entrada respectivamente. Cada bloque IIR de segundo orden puede ser implementado de diferentes formas: forma directa I, forma directa II o canónica y las formas transpuestas de las anteriormente citadas.

Para la presente aplicación se utilizó la forma directa I, donde la relación entrada-salida queda definida según la siguiente ecuación de diferencias, ver ecuación (4).

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + b_2x[n-2] - a_1y[n-1] - a_2y[n-2] \quad (4)$$

Los términos de la forma $y[n-n_i]$, representan una muestra pasada de la señal de salida correspondiente a un instante n_i . Del mismo modo que $x[n-n_i]$, representa una muestra retardada de la señal de entrada, correspondiente al instante n_i .

El algoritmo de cada bloque bicuadrado, implementa la ecuación de diferencias ya mostrada. Esta puede ser representada en un diagrama de flujo como se observa en Figura 4. Donde cada bloque Z^{-1} , representa un elemento de retardo, el cual implica el almacenamiento de una muestra de señal.

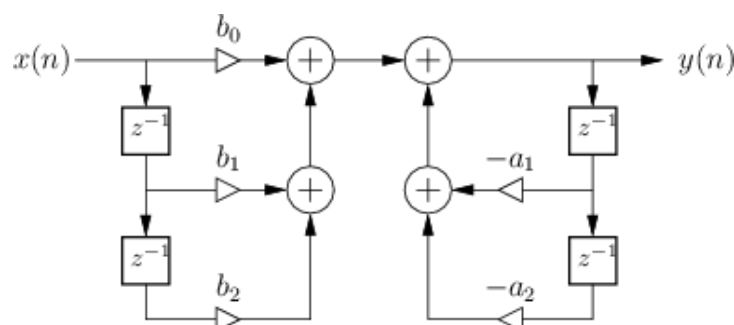


Figura 4: Filtro IIR de 2º orden implementado en forma directa I.

4.2 Cálculo y diseño de filtros

El diseño de los filtros de ponderación A y C al igual que los filtros de octavas, es llevado a cabo mediante software de cálculo matemático. Estos filtros deben cumplir con las especificaciones de MNS calificados como Clase 2 ([IEC 61672-1:2002](#)).

El filtro A resulta de sexto orden, por lo que fue implementado en una cascada de tres etapas bicuadradas. En la [Figura 5](#), se visualiza la respuesta en frecuencia del filtro obtenido y los márgenes de tolerancia permitidos para Clase 2.

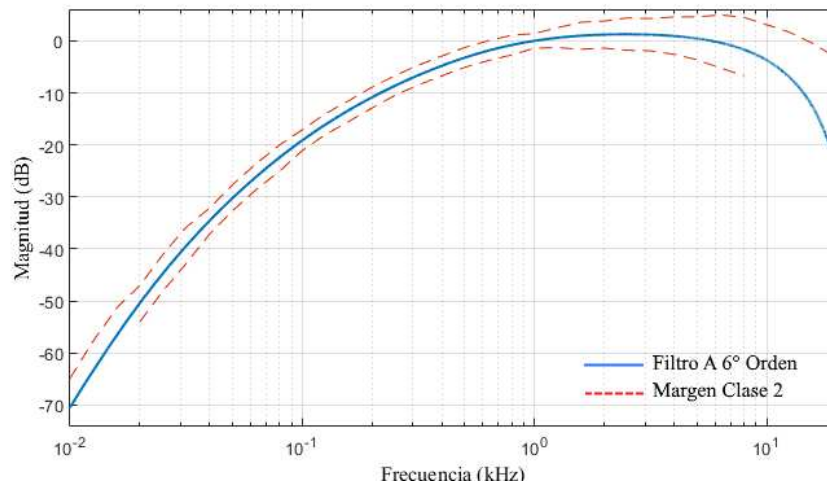


Figura 5: Respuesta en frecuencia del filtro A.

De igual modo se obtuvo un filtro de ponderación C, de cuarto orden.

En cuanto los filtros de octavas –de sexto orden– se logró una respuesta en frecuencia que cumple ampliamente los requerimientos para Clase 2. En [Figura 6](#), se observa el comportamiento del filtro de 1/1 octava normalizado.

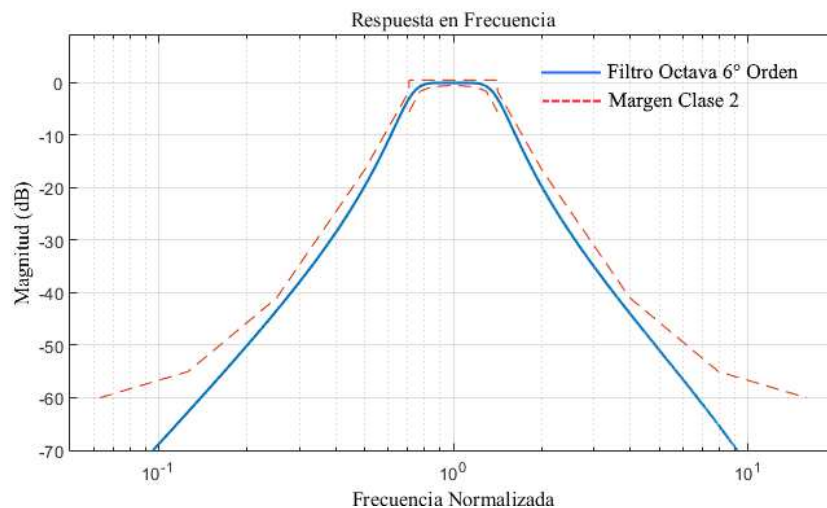


Figura 6: Respuesta de filtro de octavas normalizado vs márgenes de Clase 2.

Los márgenes de tolerancia de Clase 2 considerados para filtros de ponderación A y C, están definidos en [ANSI S1.42:2001](#), y para los de octavas en [ANSI S1.11:2004](#).

5 EVALUACION DEL SISTEMA DE MEDICION

En primera instancia, se llevó a cabo el relevamiento de la curva de respuesta en frecuencia del sistema de medición. En segunda instancia, un análisis del comportamiento de los filtros digitales de 1/1 octavas implementados.

5.1 Respuesta en frecuencia

El análisis minucioso de la respuesta en frecuencia del conjunto micrófono-plataforma de procesamiento, permite identificar puntos de resonancia en la respuesta del micrófono que deberán ser compensados y corregidos durante el procesamiento de los niveles. Se evaluó la respuesta en frecuencia del sistema por medio de dos metodologías: a) aplicando tonos puros de un calibrador acústico y b) contrastando en campo libre los niveles medidos por el prototipo frente a un MNS comercial de referencia.

- a) Se utilizó un calibrador multifunción Brüel & Kjaer 4226. Este genera un tono puro de 94 dB, en cada frecuencia central de las bandas de octavas normalizadas comprendidas entre 31,5 Hz y 16 kHz. En este caso se realizó un barrido en frecuencia entre las octavas de 31,5 Hz y 8 kHz. Durante la medición, el parámetro relevado por el prototipo fue L_{Zeq} . Los resultados se presentan en Figura 7, donde se ha normalizado la respuesta con respecto a 1 kHz.

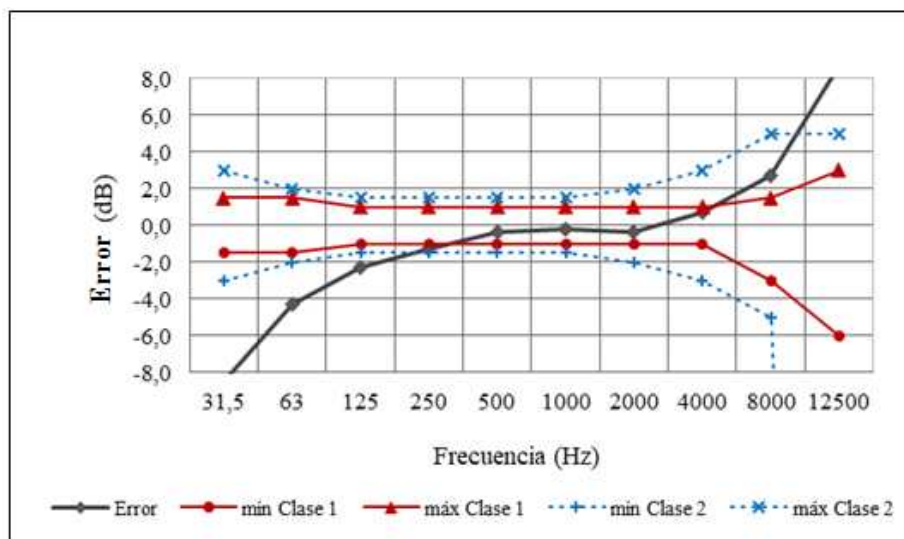


Figura 7: Evaluación de la respuesta en frecuencia del sistema de medición.

En esta gráfica puede observarse la respuesta del sistema de medición, a la cual se adicionan los márgenes máximos y mínimos de tolerancia para instrumentos Clase 1 y Clase 2. Se infiere que el sistema cumple con los requerimientos de un MNS Clase 2, entre los 250 Hz y 8 kHz.

- b) La medición en campo libre, fue realizada en una cámara semianecoica. Se utilizó como fuente de excitación un altavoz generando un tono con ajuste continuo de frecuencia y como referencia un MNS RION NL-31 (Clase 1). La central de monitoreo y el MNS fueron colocados a una distancia equidistante de la fuente acústica. Ambos instrumentos median simultáneamente el mismo parámetro $-L_{eq}$ sin ponderación, L_{Zeq} . Los resultados se presentan en Figura 8.

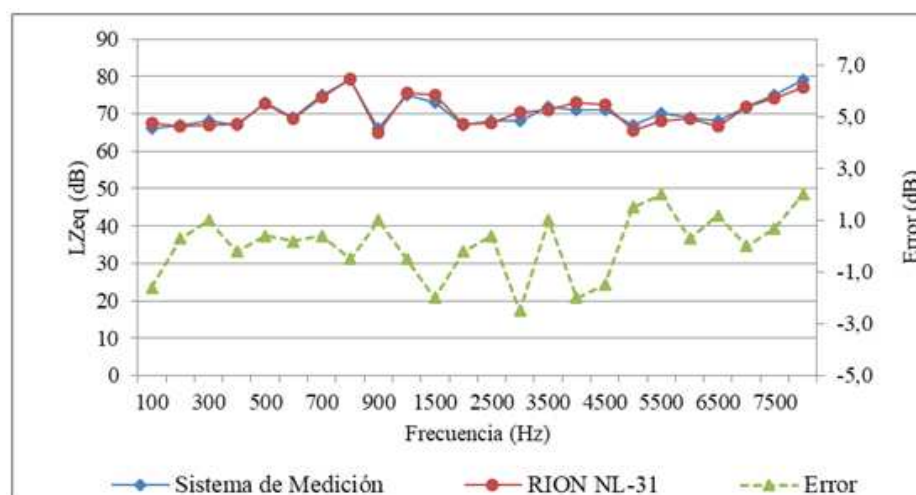


Figura 8: Evaluación del comportamiento del sistema en campo libre.

De la gráfica se extrae, que los niveles relevados con el sistema de medición y el MNS comercial son muy próximos entre sí, el error –curva verde discontinua– presenta una fluctuación comprendida entre $\pm 2,5$ dB.

5.2 Evaluación de filtros de octavas

Se analizó aquí el desempeño de los filtros de octavas implementados. Como señal de prueba se utilizó un generador de ruido rosa Brüel & Kjaer ZI 0055, en conjunto con un acoplador del Brüel & Kjaer Type 3541. Se logra un mismo nivel de intensidad sonora, colocando el sistema de medición y el MNS de referencia (RION NL-31), en cada uno de los puertos enfrentados del acoplador.

Los filtros ensayados correspondieron a las octavas comprendidas entre 63 Hz y 4 kHz. El generador de ruido rosa se ajustó a su nivel de amplitud media.

Durante la medición de cada filtro de octava, el MNS comercial, se configuró para medir aplicando el filtro de la octava correspondiente a evaluar. Ambos instrumentos calculaban el nivel L_{Zeq} . Los resultados se resumen en [Tabla 1](#) y [Figura 9](#).

Filtro de Octava [Hz]	Sistema de Medición [dB]	RION NL-31 [dB]	Error [dB]
63	65,0	68,0	3,0
125	69,0	71,8	2,8
250	71,0	73,4	2,4
500	73,0	73,9	0,9
1000	74,0	75,3	1,3
2000	73,0	73,9	0,9
4000	75,0	76,7	1,7

Tabla 1: Evaluación de filtros de octava aplicando ruido rosa.

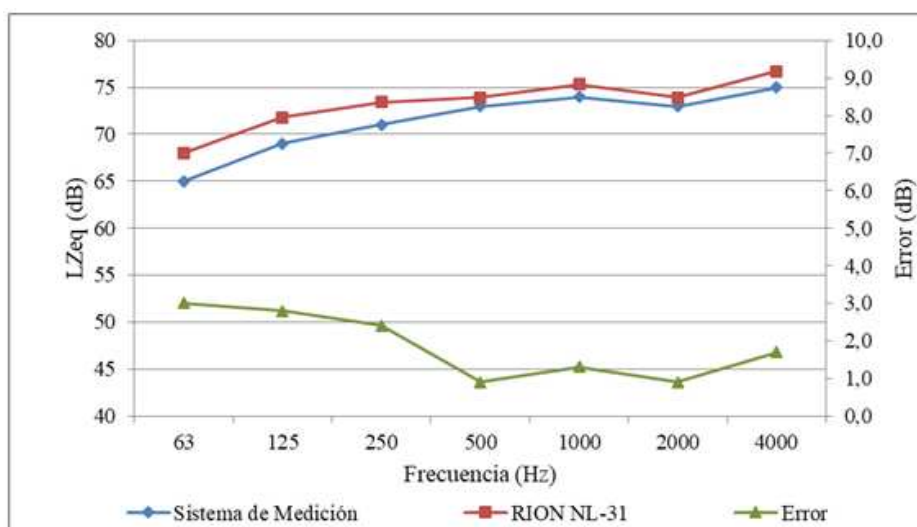


Figura 9: Evaluación del comportamiento de los filtros de octavas.

Los filtros de octavas implementados en el sistema propuesto muestran un comportamiento equivalente al de los filtros del instrumento de referencia, el error permanece por debajo de 3 dB y resulta ser positivo, siendo el nivel medido por el prototipo siempre menor que el del MNS de referencia. Asimismo el error es más significativo en el extremo de baja frecuencia siendo necesario, por lo tanto, corregir el mismo.

6 CONCLUSIONES

El sistema aquí propuesto está orientado al monitoreo de ruido de manera autónoma y remota. En esta primera etapa de desarrollo, se ha llevado a cabo una integración de los principales elementos del sistema de medición, pudiendo concluir que es factible la obtención de un instrumento que cumpla con los requerimientos de un MNS Clase 2.

De las mediciones efectuadas para evaluar este primer prototipo, podemos concluir que la respuesta en frecuencia del sistema presentó un comportamiento adecuado, aunque con algunas discrepancias en baja frecuencia, principalmente por debajo de los 250 Hz respecto de los requerimientos para MNS Clase 2. Estas discrepancias pueden ser compensadas electrónicamente.

En cuanto al análisis de los filtros de 1/1 octavas, la correspondencia entre los niveles obtenidos con el sistema de medición y el instrumento de referencia, demuestran el buen desempeño de estos filtros.

Por otro lado, la elevada capacidad de procesamiento de la plataforma escogida, permite la ejecución de los algoritmos de cálculo y filtrado sin inconvenientes, así como la posibilidad de realizar compensaciones de algunos errores.

REFERENCIAS

- ANSI Standard S1.11, Specification for octave-band and fractional-octave band analog and digital filters, 2004.
- ANSI Standard S1.42, Design response of weighting networks for acoustical measurements, 2001.
- Barham, R., Chan, M., Cand, M., Practical experience in noise mapping with a MEMS microphone based distributed noise measurement system. *InterNoise 2010*, Lisboa, Portugal, June 2010.
- Basner, M.; Babisch, W.; Davis, A.; Brink, M.; Clark, C.; Janssen, S.; Stansfeld, S. Auditory and nonauditory effects of noise on health. *The Lancet*, Vol. 383 (9925), 1325-1332, 2014.
- Bodoira, R., Perez Villalobo, J., Contrera, H., Lunati, V., Ortiz Skarp, A., Measurement of sound levels in reconfigurable hardware platform. *Proceedings de IX Congreso Argentino de Sistemas Embebidos - CASE 2018*. Córdoba, Argentina, 15-17 de Agosto, 2018.
- Chowdhury, I., Scenario of traffic noise pollution and its impact on human health: an empirical case study of Kolkata city. *International Journal of Current Research*, 8:33744–33750, 2016.
- Evans, G., Hygge, s., Bullinger, M., Chronic noise and psychological stress. *Psychological Science*, 6:333–338, 1995.
- González, F., Rosales, J., Perez, R., Lunati, V., Ortiz Skarp, A., Micrófonos MEMS: análisis y caracterización acústica. *Proceedings de XIII Congreso Argentino de Acústica VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, 29 y 30 de Octubre, 23, 2015.
- IEC 61672-1, International Standard, Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications, 2002.
- Intel Corporation, Application Note 455: Understanding CIC compensation filters, 2007.
- Lunati, V., Podlubne, A., González, F., Rosales, J., Urquiza Manzanelli, A., Ortiz Skarp, A., Arias, C., Micrófonos MEMS: Análisis y aplicaciones en audición binaural. *Mecánica Computacional Vol. XXXII*, 2935-2950, 2013.
- Perez Villalobo, J., Contrera, H., Bodoira, R., Caceres, E., Hinalaf, M., Mapas espectrales de ruido aplicados al estudio de la contaminación sonora en la ciudad de Córdoba. *Proceedings de VI Congreso Bianual Proimca – IV Congreso Bianual Prodeca*. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina, 6-8 de Septiembre, 2017.
- Sotirakopoulos, K., Barham, R., Piper, B., Designing and evaluating the performance of a wireless sensor network for environmental noise monitoring applications. *EuroRegio 2016*, Porto, Portugal, June 2016.
- ST Microelectronics, *Application note 4426: Tutorial for MEMS microphones*, 2017.
- ST Microelectronics, *MP34DB02 Datasheet: MEMS audio sensor omnidirectional digital microphone*, 2014.
- Todorović, D., Salom, I., Čelebić, V., Prezelj, J., Implementation and application of FPGA platform with digital MEMS microphone array, *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering*, IcETAN 2017, Kladovo, Serbia, June 5-8, 2017, AKI2.2.1-6.
- Zannin, P., Diniz, F., Calixto, A., Barbosa, W., Environmental noise pollution in residential areas of the city of Curitiba. *Acustica*, 87: 625–628, 2001.