

# Diseño e implementación de un sistema de control activo de ruido (CAR) desarrollado en tecnología FPAA

## Design and Implementation of an Active Noise Control (ANC) developed in the FPAA technology

Fecha de recepción: 2 de septiembre de 2012  
Fecha de aprobación: 15 de noviembre de 2012

Jorge E. Mondragón E.\* , Francisco E. Moreno G.\*\* ,  
Marlon Hernández C.\*\*\* , José A. Becerra V.\*\*\*\*

### Resumen

Presenta el diseño e implementación de un sistema de Control Activo del Ruido (CAR) en un sistema de arreglos análogos como controlador (FPAA). El principio de funcionamiento de esta metodología de control es el fenómeno de interferencia destructiva y superposición lineal de ondas; la idea es generar una señal idéntica a la señal de ruido que se desea cancelar, logrando atenuar el ruido que se propaga en el interior del entorno acústico. Para la validación de esta aplicación se construyó un prototipo experimental; durante las pruebas realizadas se lograron atenuar niveles de presión sonora en el orden de los 20 a 40 dB, dependiendo la frecuencia fundamental del ruido. El desarrollo de este proyecto es un aporte a la solución de problemas y a la

### Abstract

It presents the design and implementation of an active noise control system (ANC)' technology developed in an analog system used as controller (FPAA). This control methodology's operating principle is the destructive interference phenomenon and the waves' linear superposition. The idea is to generate a signal identical to the noise signal to be cancelled, by dwindling the noise that spreads into the acoustic environment. To validate this application an experimental prototype was built, which during the tests, was able to temper sound pressure levels in the order of 20 to 40dB depending on the noise fundamental frequency. This project development is a contribution to solve problems and generate low-cost alternatives for the technology acquisition and

\* Ingeniero Electrónico, Grupo de Investigación en Automatización y Control –GIAC–, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. jorgeenriqueme@ufps.edu.co

\*\* Doctor en Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación en Automatización y Control –GIAC–, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. femgarcia@ufps.edu.co

\*\*\* Magister en control de procesos, Grupo de Investigación en Automatización y Control –GIAC–, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

\*\*\*\* Magister en control de procesos, Grupo de Investigación en Automatización y Control –GIAC–, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

generación de alternativas de bajo costo para la adquisición y adaptación tecnológica en el área de comunicaciones industriales y automatización industrial en la Universidad Francisco de Paula Santander-Colombia.

**Palabras clave:** FPAA, Control activo de ruido, Acústica.

adaptation in the industrial communications and industrial electronics area, at Francisco de Paula Santander University -Colombia.

**Keywords:** FPAA, Active Noise Control, Acoustics.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo industrial ha traído consigo un problema de salud pública a causa del ruido, que es una fuente de contaminación ambiental, generador de molestias, distracción e, incluso, a niveles altos y prolongados tiempos de exposición ocasiona daños irreversibles en el oído humano. Una exposición extendida a niveles continuos de ruido produce alteraciones psicológicas y fisiológicas en la población, como es la falta de capacidad de concentración, entre otras. Sin duda, la existencia de ruido se traduce en una pérdida de calidad de vida, tanto en el ambiente laboral como en el doméstico y urbano [1].

El ruido está presente en cualquier sociedad moderna. Los medios de transporte, las plantas industriales, los transformadores eléctricos, los sistemas de aire acondicionado y de calefacción, entre otros, producen ruido. Resulta paradójico que el avance en los sistemas de generación energética, asociado al progreso social y tecnológico, conlleve el deterioro del ambiente acústico que nos rodea. El ruido en las ciudades es un problema creciente que afecta a toda la población, tanto que las distintas administraciones, en el ámbito autonómico y estatal, se han visto obligadas a elaborar normativas sobre los niveles máximos permitidos; sin embargo, controlar y, en su caso, reducir el ruido es un reto tecnológico importante, por la complejidad temporal y espacial que presenta. La reducción del ruido implica además un considerable coste económico, por lo que en numerosas ocasiones se prefiere disminuirlo a niveles aceptables para la población que lo padece, en lugar de cancelarlo completamente [1].

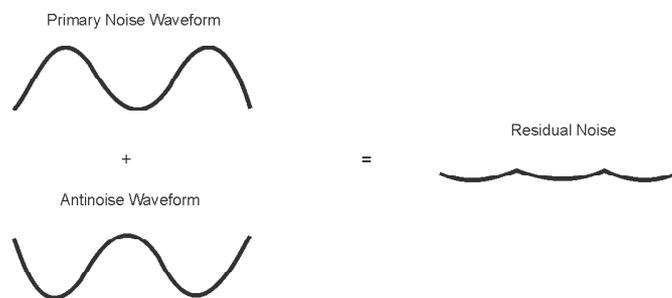


Figura 1. Concepto de control activo de ruido [2]

El control *activo* de ruido, mediante diversos métodos, es una técnica novedosa que ha tomado fuerza en los últimos años; se denomina *activo* porque busca reducir el ruido respondiendo a la forma como se da en el momento. El sistema de control de ruido activo contiene un dispositivo electroacústico que atenúa el ruido no deseado mediante la generación de ondas de sonido (antirruído) de igual amplitud y fase opuesta. El ruido primario (el ruido no deseado) y el antiacústico combinan, dando lugar a la cancelación de ambos [7]. El rendimiento de la cancelación de ruido primario depende de la precisión en amplitud y fase del antirruído generado [8], bajo el principio del control activo del ruido (CAR).

Este proyecto de investigación se centra en el desarrollo de sistemas electrónicos flexibles, reutilizables y de rápida reconfiguración, integrando áreas como la microelectrónica, bajo tecnologías de Arreglos Analógicos Programables (FPAA), para el procesamiento de señales y ejecución de acciones de control activo a nivel experimental, en procura de eliminar los efectos dañinos que genera el ruido presente en ambientes industriales y domésticos.

## II. CONTROL ACTIVO DE RUIDO

Por control activo de ruido acústico (CAR) se entiende aquella técnica capaz de atenuar el ruido acústico existente en un determinado recinto, mediante la emisión de otro ruido acústico; esto es posible cuando las ondas de presión acústica de ambos ruidos estén en oposición de fase – interferencia destructiva– (Fig. 1).

Para realizar una disminución de la presión acústica en un recinto es necesario un sistema de control que adapte su respuesta ante las posibles variaciones del ruido y del entorno acústico de cancelación; dicho sistema de control está formado por los siguientes elementos [3]:

*Sensores.* Micrófonos, acelerómetros u otros dispositivos que permitan obtener referencias de los niveles de presión acústica por cancelar.

*Actuadores.* Dispositivos electroacústicos a través de los cuales se modifica el campo acústico con el fin de obtener una disminución de la presión acústica; suelen ser altavoces y transductores piezoeléctricos.

*Planta.* Campo acústico por controlar; ejemplos clásicos son: el entorno ruidoso en el oído (auricular activo de protección auditiva), la propagación de ondas planas en el interior de un conducto de aire

acondicionado, el ruido en el interior de un automóvil, etc.

*Controlador.* Sistema electrónico que procesa las señales de los sensores, y, mediante algún conocimiento previo de la planta, genera la señal que será transformada en ondas de presión acústica por los actuadores.

En los CAR, los actuadores son altavoces que generan una onda desfasada  $180^\circ$  respecto de la onda original, para cancelar el ruido [6]; o, cuando el ruido es generado por la vibración de una estructura flexible cambian la forma como irradian el sonido. Aunque va en contra de la intuición, adicionar ruido a un sistema reduce efectivamente los niveles sonoros [4]. El Control Activo de Ruido funciona cuando uno o ambos efectos físicos se logran: interferencia destructiva y equiparación de impedancias. En la Fig. 2 se aprecia el sistema CAR propuesto y sus componentes.

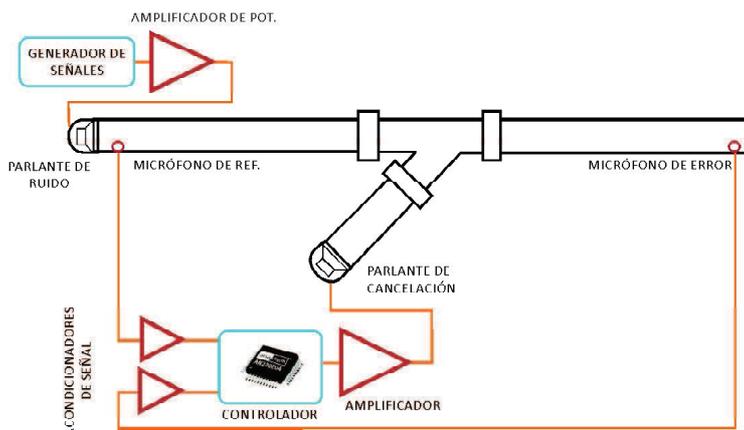


Figura 2. Diagrama de bloques componentes del CAR propuesto

### III. FPAA AN220E04

La *Field-Programmable Analog Array* (FPAA) es un circuito integrado encargado del tratamiento de las señales analógicas para aplicaciones electrónicas específicas de alta fiabilidad, precisión y flexibilidad en su reconfiguración sin necesidad de crear nuevos diseños electrónicos; su estructura puede ser observada en la Fig. 3.

El integrado consta de cuatro celdas de entrada/salida donde se conectan las señales analógicas procedentes del exterior; estas celdas de entrada admiten señales unipolares y diferenciales. La cuarta celda tiene un multiplexor analógico a la entrada que permite la conexión de cuatro señales diferenciales u ocho señales unipolares de entrada. Estas celdas de entrada/salida proporcionan elementos de acondicionamiento para un primer tratamiento de la

señal. Toda la circuitería interna analógica del dispositivo es completamente diferencial, definiéndose la tensión de referencia interna VMR (Voltage Main Reference) de 2V sobre la que varían las señales. El dispositivo contiene cuatro CAB (Configurable Analog Block), donde se realiza el procesamiento analógico. Los cuatro CAB tienen acceso a una tabla de consulta LUT (Look Up Table) que

permite ajustar los valores de la salida de los elementos programables en función de valores de señales de entrada o tiempo. Esta LUT se puede usar para implementar funciones de transferencia definidas por el usuario, generar funciones arbitrarias y definir un filtrado que dependa de un valor de tensión. En la Fig. 4 se observa la programación y simulación de la FPAA.

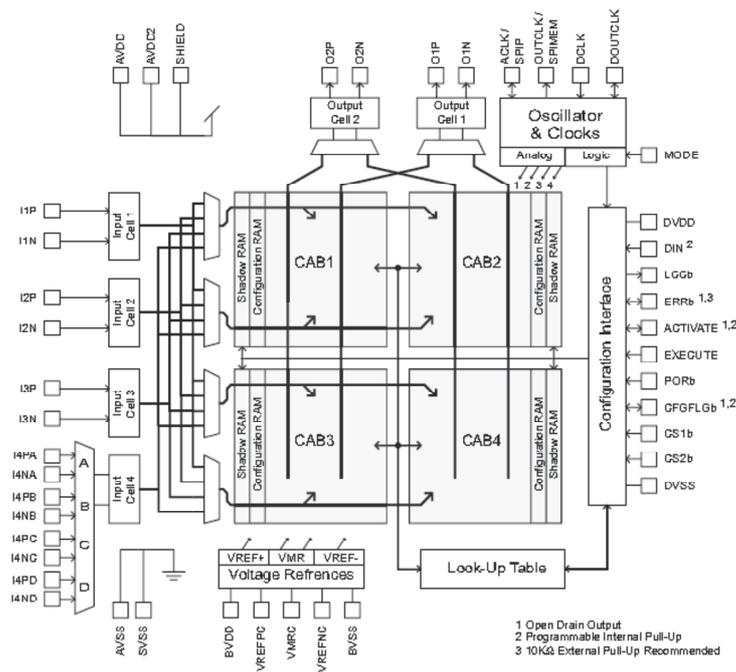


Figura 3. Arquitectura de AN221E04 [5]

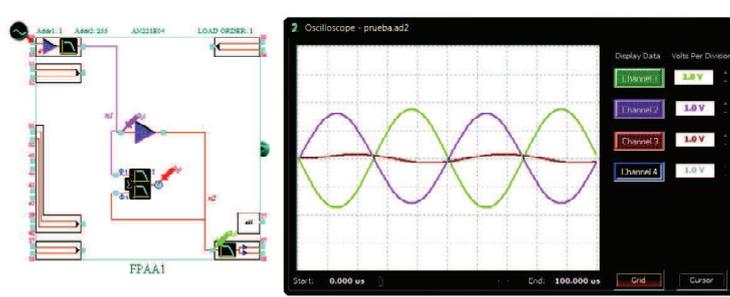


Figura 4. Programación y simulación de la FPAA

#### IV. BANCO DE PRUEBAS

El prototipo desarrollado es un escenario de cancelación simple que permite la verificación de los datos y del funcionamiento del controlador. La fuente primaria generadora de ruido está dada por un generador de señales, y la fuente de eliminación es la salida del controlador a través de un amplificador de potencia. El sensor de referencia toma la señal de entrada amplificada y enviada al ambiente por medio de un parlante. El sensor de error puede situarse en cualquier punto del ducto donde estén dispuestos los altavoces. Se ha escogido esta configuración debido a su simplicidad y porque realmente el verdadero interés se centra en el funcionamiento del propio controlador electrónico. En las Fig. 5 y 6 se puede observar el banco

experimental. El ducto tiene un diámetro  $d = 0,0762$  [m], y teniendo en cuenta la velocidad del viento  $c = 300$  [m/s], a través de la ecuación (1) se define como la máxima frecuencia de 1152 [Hz] de propagación de ondas planas a través de un ducto uniforme de sección transversal circular de diámetro  $d$  [6].

$$f = \frac{1,84c}{2\pi d} = 1152 \text{ [Hz]} \quad (1)$$

La principal fuente de ruido se ubicó en un extremo, y el parlante de cancelación, a 1,5 metros. El micrófono de referencia se ubicó a una distancia de 0,05 metros del parlante, y el micrófono de error, a 0,1 metros del final del ducto. En la Fig. 7 se observan las especificaciones del sistema.

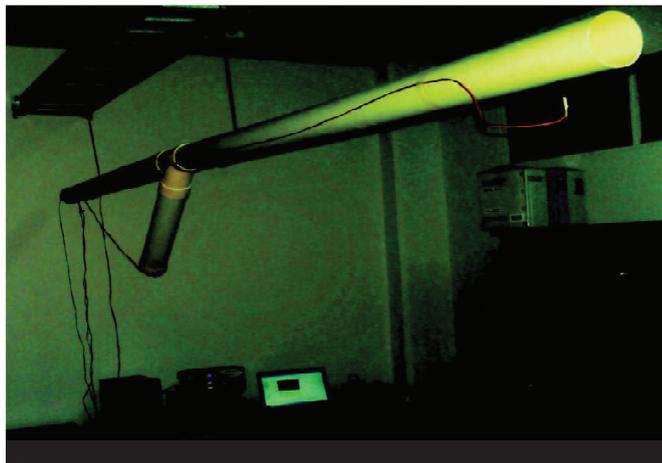


Figura 5. Banco experimental final



Figura 6. Banco experimental, circuitos y elementos de medición

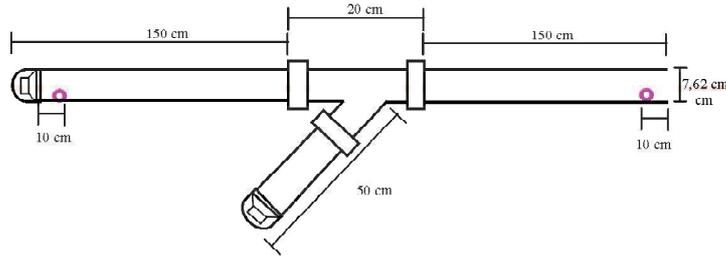


Figura 7. Dimensiones del ducto

V. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para evaluar la capacidad del algoritmo, el sistema físico es excitado por una función senoidal en una gama de frecuencias entre 50 Hz y 1100 Hz; se mantuvieron los mismos parámetros en cuanto a las ganancias de los amplificadores, y la misma ganancia dada por la FPAA. A continuación se presentan algunas de las mediciones realizadas al sistema para su posterior análisis.

La Fig. 8 muestra la señal de entrada al ducto y su salida. En el espectro de frecuencias (FFT) de la señal de entrada, en su componente fundamental de 50 Hz, se obtuvo un valor máximo de -20 dBV y una media de -74,4 dBV. La Fig. 8b hace referencia a la señal de salida del sistema; se observó su valor máximo en -43,3 dBV y una media de -76,8 dBV. Se observó una atenuación de, aproximadamente, 20 dB para la frecuencia fundamental.

En el espectro de frecuencias (FFT) de la señal de entrada en su componente fundamental de 600 Hz se obtuvo un valor máximo de -4,8 dBV y una media de -68 dBV. La Fig. 9b hace referencia a la señal de salida del sistema; se obtuvo su valor máximo en -8,8 dBV y una media de -68 dBV. Se tiene una atenuación aproximadamente de 4 dB para la frecuencia fundamental.

En el espectro de frecuencias (FFT) de la señal de entrada en su componente fundamental de 1100 Hz se obtuvo un valor máximo de 4 dBV y una media de -64,8 dBV. La Fig. 10b hace referencia a la señal de salida del sistema; se obtuvo su valor máximo en -17,6 dBV y una media de -68,8 dBV. Se tiene una atenuación aproximadamente de 21 dB para la frecuencia fundamental.

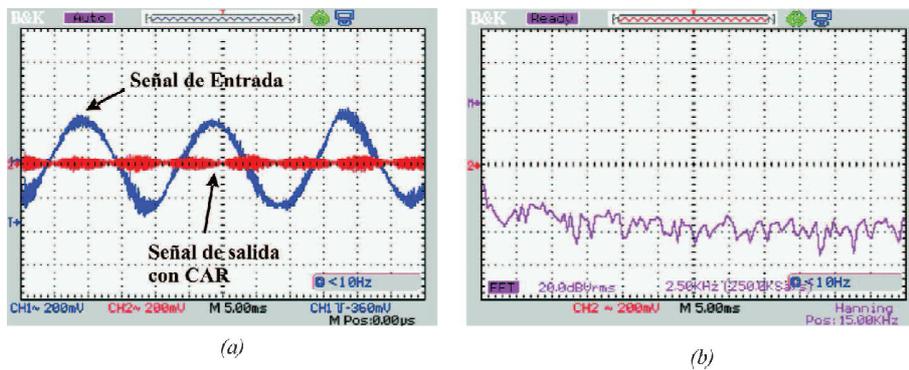


Figura 8. Respuesta obtenida a 50 Hz (a) entrada y salida. (b) espectro de frecuencia de la salida

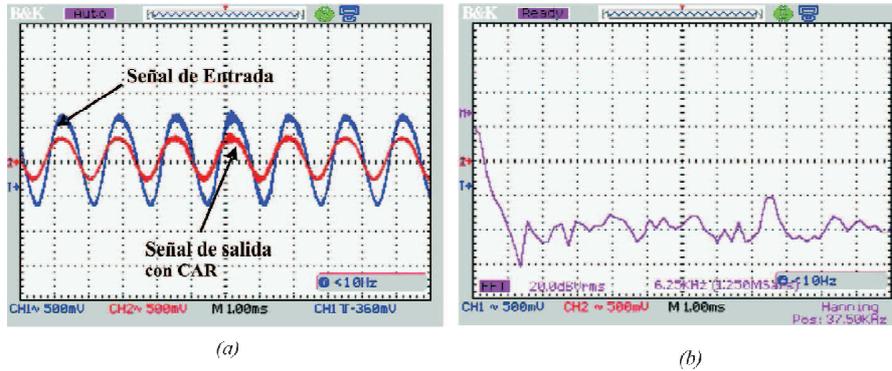


Figura 9. Respuesta obtenida a 600 Hz (a) entrada y salida. (b) espectro de frecuencia de la salida

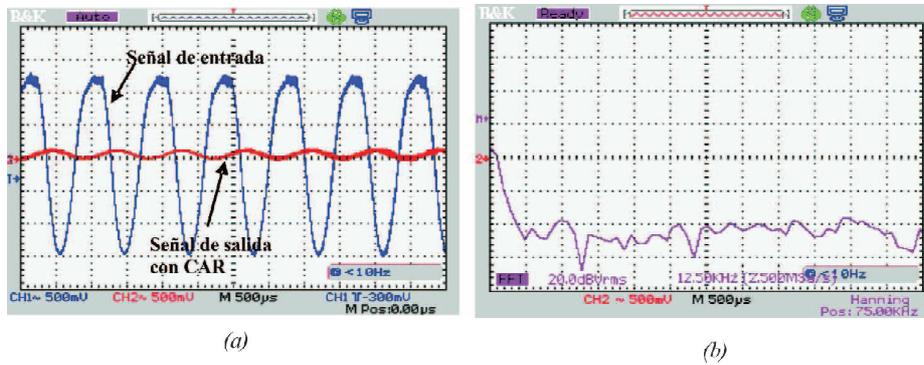


Figura 10. Respuesta obtenida a 1100 Hz (a) entrada y salida. (b) espectro de frecuencia de la salida.

A continuación se presentan tabulados los valores obtenidos, para su posterior análisis.

Tabla 1. Valores obtenidos

FRECUENCIA	REFERENCIA (FFT)		ERROR (FFT)		ATENUACIÓN FFT (REF-ERROR)
	MAX.	MEDIA	MAX.	MEDIA	
50	-20	-74,4	-43,3	-76,8	23,3
150	-12	-76,8	-55,2	-77,6	43,2
250	-4	-70,4	-17,6	-71,2	13,6
358	1,6	-70,4	-19,2	-71,2	20,8
400	-1,6	-68,8	-12,8	-70,4	11,2
500	-2,4	-70	-14,4	-71,9	12
600	-4,8	-68	-8,8	-68	4
700	-0,8	-69,6	-10,4	-71,2	9,6
850	0	-68,8	-14,4	-69,2	14,4
960	-1,4	-66,4	-15,2	-68	13,8
1000	-1,6	-67,2	-16	-69,6	14,4
1100	4	-64,8	-17,6	-68,8	21,6

En la tabla se puede observar un rendimiento significativo, entre un rango de frecuencias de 50 a 200 Hz, superior a 20 dB de atenuación; en las Figs. 11 y 12 se observa que entre los 500 y 700 Hz no se

tiene una buena respuesta en cuanto a la atenuación del ruido. De la Tabla 1 se obtuvieron los siguientes gráficos para comprender el comportamiento y la tendencia del sistema CAR.

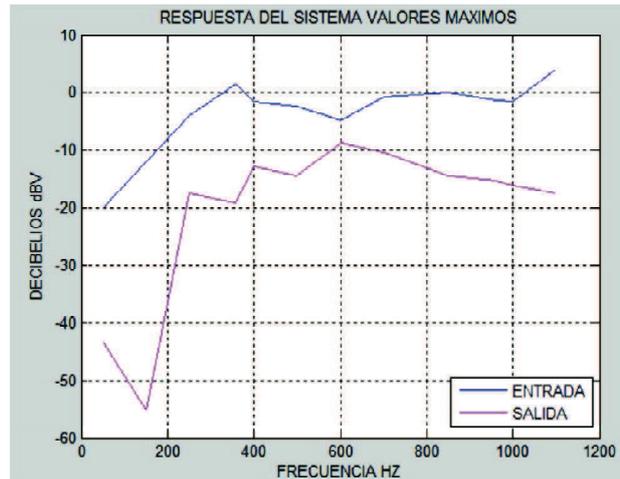


Figura 11. Respuesta del Sistema

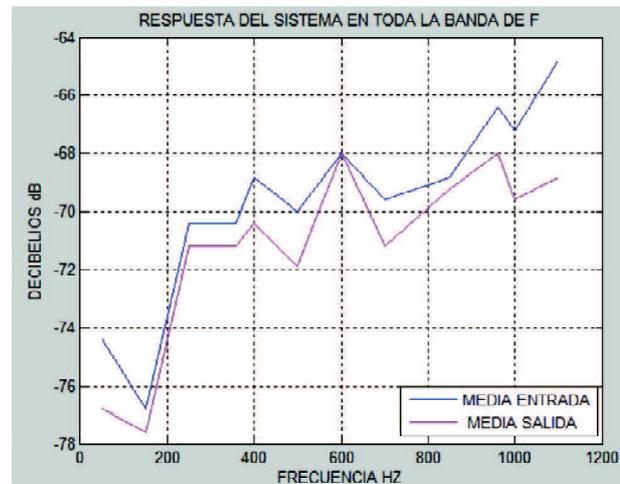


Figura 12. Respuesta en el ancho de banda total

Los resultados anteriores muestran que la atenuación varía respecto de las frecuencias de funcionamiento del sistema. La propuesta presentada con retroalimentación en malla abierta demostró su eficacia para diferentes frecuencias; para otras se aprecia una atenuación no tan considerable como se esperaba; para la frecuencia de 600 Hz, el sistema mostró cierta inestabilidad. A pesar de la atenuación

alcanzada, la estructura de realimentación muestra cierta inestabilidad durante el proceso de cancelación, debido a que el método utiliza solamente el micrófono de error, con lo que se puede concluir que se perdió la información de entrada para la correcta eliminación del sonido. Este tipo de estructura se recomienda para pequeños sistemas físicos o fuentes de ruido con un ancho de banda reducido.

## VI. CONCLUSIONES

La relación S/N (señal/ruido) de los transductores también influye en el rendimiento del sistema de control, a medida que la distorsión acústica corrompe la señal de entrada. La relación S/N debe ser mayor de 40 dB para garantizar un buen funcionamiento del controlador; si la relación S/N es muy pequeña, los altavoces generan un tipo de ruido que no puede ser cancelado por el controlador.

Se comprobó que el control activo de ruido utilizando dispositivo FPAA funciona correctamente en algunos rangos de frecuencia específicos, por lo tanto, es necesario que la ganancia inversora de la FPAA sea dinámica para obtener un mejor control en toda la banda de frecuencia.

Los resultados de atenuación acústica que se consiguieron dependieron directamente de las características de los elementos que componen el sistema de control. En primer lugar, los transductores electroacústicos no son ideales, y sus imperfecciones modifican la conversión electro/mecánica/acústica que se realiza en el sistema de control.

Cuando se desea realizar algún tipo de control de ruido acústico, se debe caracterizar la fuente de ruido, su potencia y el espectro de frecuencias de sonido; por lo tanto, es importante que el micrófono de entrada no se encuentre en un punto nodal (punto de magnitud menor); si esto ocurre, el controlador no adquirirá toda la información necesaria para realizar un control eficaz.

Esta investigación permitió estudiar las técnicas de control activo de ruido (CAR) desarrolladas en tecnología FPAA, y su aporte, a nivel experimental, para reducir los efectos dañinos del ruido en nuestro entorno de trabajo o de hogar a bajos costos no tiene precedentes a nivel nacional.

Mediante la metodología de control implementada se lograron atenuar ruidos a bajas frecuencias en el interior de un ducto, basados en técnicas de control

activo. Durante la validación de las pruebas realizadas al sistema se tuvieron atenuaciones del orden de los 10 dB hasta los 40 dB; las pruebas se realizaron con señales senoidales de uno, dos y tres tonos.

## REFERENCIAS

- [1] P. Cobo, *Control activo del ruido. Principios y aplicaciones*. Madrid: CSIC, Colección Textos Universitarios, N.º 26. 1997.
- [2] J. Martínez *Control activo de ruido. Fundamentos y aplicaciones en conducto*. Ponencia a cargo de Técnico de Proyectos, Dirección de Explotación Unidad de Montajes de Saint-Gobain Wanner, 2010.
- [3] G. B. B. Chaplin, R. A. Smith and T. P. C. Bramer, *Methods and Apparatus for Reducing Repetitive Noise Entering the Ear*, US Patent No. 4654871, 1987.
- [4] G. G. B. Chaplin and R. A. Smith, «Waveform Synthesis - The Essex Solution to Repetitive Noise and Vibration», *Proc. Inter-Noise 83*, pp. 399–402, 1983.
- [5] ANADIGM. *Manuales de funcionamiento, programación y operación*. USA. [En línea]. Disponible en: <http://www.anadigm.com/>
- [6] L. C. Delfino, I. J. C. Núñez, P. M. Cardoso, J. F. Ribeiro, «Active Noise Control Implemented in a DSP Platform», *Internoise 2005*, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [7] P. M. Clarkson, *Optimal and Adaptive Signal Processing*. Boca Ratón, FL: CRC Press, 1993.
- [8] L. J. Eriksson and M. A. Allie, «Use of random noise for online transducer estimate in an adaptive active attenuation system», *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 85, pp. 797–802, feb. 1989.