

Implementación de un control activo de ruido acústico de baja frecuencia en el DSP TMS320C50, utilizando un filtro adaptable en configuración Feedback

Andrés O. Pizarro, E. Romero Aguirre

Resumen—En este artículo se describe a detalle el desarrollo de un sistema de control activo de ruido acústico, usando un filtro digital adaptable en configuración Feedback, basado en el algoritmo de adaptación de mínimos cuadrados (LMS), e implementado en un Módulo para principiantes DSP Starter Kit (DSK) del DSP TMS320C50 de Texas Instruments; con la meta final de eliminar el efecto nocivo del ruido producido por aires acondicionados de ventana en las aulas del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

Palabras clave— Ruido, control activo de ruido acústico, filtros adaptables, LMS, Feedback, TMS320C50.

I. INTRODUCCION

El sistema planteado en este artículo surge de la necesidad de contar con un elemento capaz de eliminar el ruido acústico producido por los aires acondicionados de ventana que se encuentran en funcionamiento desde mayo hasta octubre en las aulas del ITSON. Este ruido afecta de manera ostensible la comunicación verbal maestro-alumnos y alumnos-alumnos, lo cual provoca en consecuencia una disminución en la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Dado que el ancho de banda del ruido producido por estos aparatos se encuentra en el rango de 30 a 200 Hz, los medios pasivos que se utilizan comúnmente para adecuar acústicamente un recinto (como cubiertas de absorción) no son aplicables en este caso, ya que su rango de utilización es en frecuencias mayores a 600 Hz.

II. ANTECEDENTES

El *sonido* es una alteración física en un medio, ya sea líquido, sólido o gaseoso que puede ser detectada por el oído [1].

El sonido se propaga, y se atenúa en magnitud conforme se

aleja de su fuente, debido a que el medio que sirve de medio de propagación, absorbe o disipa parte de la energía del sonido.

El *ruido acústico* se refiere a todo sonido no deseado, también puede definirse como el sonido generalmente de naturaleza aleatoria, cuyo espectro no exhibe componentes de frecuencia con diferencias notables entre ellos [2].

El fenómeno por el cual es posible la cancelación del ruido es la interferencia destructiva de dos o más trenes de ondas que pasan al mismo tiempo por el mismo lugar, un ejemplo de este fenómeno se muestra en la figura 1.

La interferencia destructiva es un fenómeno físico que se da al combinar dos ondas de igual frecuencia y amplitud, pero desfasadas 180° entre sí, de manera que se tengan en la misma zona y en el mismo momento, compresiones y expansiones opuestas. Resultando de esto zonas de equilibrio (en las que no hay cambio de presión), acústicamente denominadas zonas de silencio [3].

Este es el principio de funcionamiento básico del control activo de ruido, donde se controla una fuente de sonido que da el sonido anti-fase de los sonidos no deseados.

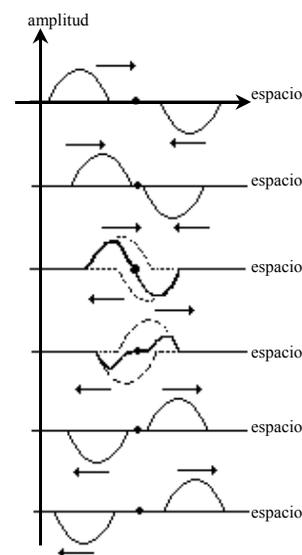


Fig. 1. Interferencia de Ondas.

Manuscrito recibido el 14 de junio del 2005. Este trabajo es respaldado por impulso, revista de electrónica, eléctrica y sistemas computacionales.

Andrés O. Pizarro L, se desempeña como profesor-investigador de tiempo completo del dpto. de Ing. Eléctrica del ITSON Ave. Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON; Ciudad Obregón, Sonora, México; C.P. 85130; e-mail:).

Eduardo Romero A. actualmente esta en Dpto. de Ing. Eléctrica del Instituto Tecnológico de Sonora. Ave. Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON; Ciudad Obregón, Sonora, México; C.P. 85130; (e-mail eromero@itson.mx)

La efectividad de la cancelación activa del ruido depende de la correcta combinación entre sus aspectos acústicos y los de control. Dentro de los aspectos acústicos, se consideran:

- Principio de cancelación.
- Cancelación global o local.
- Complejidad espacial del ruido.
- Tipo de ruido.
- Origen del ruido
- Configuración geométrica de las fuentes y sensores.

Se ha determinado que el control activo de ruido acústico resulta más efectivo y funcional para controlar ruido de frecuencias menores a 600 Hz [4,5].

Se consideran como los aspectos de control:

- Diseño de la estrategia de control.
- Elección del algoritmo de control.
- Implementación o hardware del sistema.

El diseño del sistema de control también depende del tipo de ruido a controlar (banda ancha o estrecha); si las características del ruido varían con el tiempo, será necesario utilizar un controlador adaptable capaz de sobreponerse a esos cambios.

Las estructuras de control adaptables se dividen en dos tipos básicos: De configuración Feedforward (control en adelante) y de configuración Feedback (retroalimentados) [5].

En la implementación del control activo de ruido acústico se pueden utilizar cualquiera de los tipos de controladores Feedforward o Feedback, incluso es posible utilizar una combinación de ambos. A continuación se describen los tipos básicos de controladores adaptables desde el punto de vista de su aplicación en el control activo de ruido:

A. Feedforward

En esta configuración (figura 2) se utilizan dos micrófonos, uno sirve para monitorear la señal del ruido que se desea controlar y el otro es el micrófono de error, el cual sirve para medir el ruido residual.

La información proporcionada por el micrófono de error actualiza un vector de pesos, coeficientes o tap's, lo que representa un cambio en la función de transferencia del filtro, entonces se procesa la señal proveniente del micrófono monitor con el filtro resultante, y se obtiene así la señal que se enviará a la salida. La figura 3 muestra el diagrama a bloques de la estructura de control tipo Feedforward.

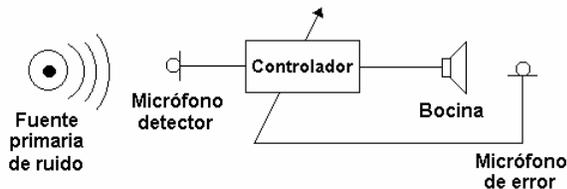


Fig. 2. Configuración Feedforward para control activo de ruido acústico.

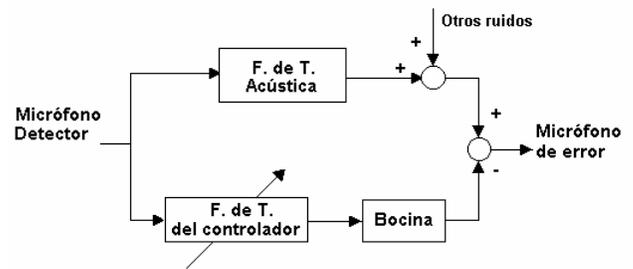


Fig. 3. Estructura Feedforward de control adaptable.

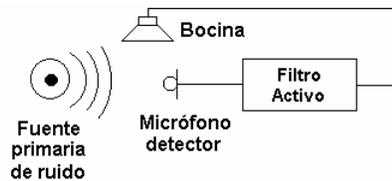


Fig. 4. Configuración Feedback para control activo de ruido.

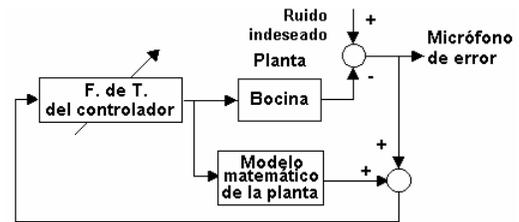


Fig. 5. Estructura Feedback de control adaptable.

B. Feedback

En el caso de la configuración Feedback, figuras 4 y 5, el procedimiento es más sencillo, se tiene un micrófono que monitorea el ruido, esta señal se envía directamente a un filtro, que deberá tener una función de transferencia apropiada, de manera que a su salida se tenga la señal de fase contraria de que se aplica a la bocina.

La función de transferencia para el filtro se calcula en referencia a la función de transferencia del medio acústico donde se realizará el control de ruido, es decir, depende del efecto de la bocina y la propagación de la señal sonora en el medio.

C. Filtros adaptables.

En general una controlador adaptable se puede ver como un filtro adaptable. Una aproximación usual para el problema de optimizado de filtros es minimizar el valor de la media cuadrática de la señal de error (mínimos cuadrados o *least squares*), que se define a su vez como la diferencia entre alguna respuesta deseada y la salida actual del filtro.

Para entradas estacionarias (estocásticamente hablando), el resultado es conocido comúnmente como el filtro Wiener, del cual se dice que es el óptimo, en el sentido de la media cuadrática [6]. Para operaciones en tiempo real un método más eficiente es usar un *Filtro Adaptable*. El filtro adaptable usa un algoritmo recursivo, el cual hace posible que el filtro tenga un

desempeño satisfactorio en un ambiente donde no están completamente disponibles las características de la señal relevante.

El algoritmo comienza utilizando datos predeterminados como condiciones iniciales. En un ambiente estacionario y después de algunas iteraciones el algoritmo converge a la solución óptima de Wiener en un sentido estadístico[9]. En un ambiente no estacionario, el algoritmo ofrece la capacidad de rastrear variaciones de tiempo en las estadísticas de los datos de entrada, siempre que dichas variaciones sean suficientemente lentas.

Una variedad de algoritmos recursivos se desarrollan en la literatura de filtros adaptables, de los que se menciona el siguiente:.

D. Estructura y operación del algoritmo LMS

La operación del algoritmo LMS (*Least Mean Squares: Mínimos cuadrados*) consiste básicamente de la combinación de dos procesos:

- 1- Un *proceso adaptable*, que consiste en el ajuste automático de un conjunto de taps de peso.
- 2- Un *proceso de filtrado*, que produce una estimación de una respuesta deseada, y un error de estimación por la comparación de la primera estimación (salida), con el valor actual de la respuesta deseada (referencia). El error de estimación es utilizado de vuelta para actuar en el proceso de adaptación cerrando el lazo de retroalimentación.

La estructura del algoritmo LMS está formada por dos componentes básicos (figura 6). Un filtro transversal alrededor del cual se construye el algoritmo LMS, y un mecanismo de control adaptable que calcula el valor de los taps de peso del filtro transversal.

El algoritmo LMS está basado en las siguientes relaciones:

1. Salida del filtro:

$$y(n) = \hat{w}^H(n) \cdot u(n) \tag{1}$$

2. Error de estimación:

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{2}$$

3. Adaptación de los taps de peso:

$$\hat{w}(n + 1) = \hat{w}(n) + \mu u(n)e^*(n) \tag{3}$$

El algoritmo descrito por las ecuaciones anteriores, es la forma compleja del algoritmo LMS[8]. Y es un miembro de la familia de algoritmos de gradiente estocástico.

La implementación del filtro adaptable utiliza un Procesador Digital de Señales (DSP-Digital Signal Processor), en el cual se corre un programa con el algoritmo de control. Existen en el mercado DSP's de diferentes marcas, cada uno con ventajas y desventajas; siendo los más comerciales aquellos manufacturados por Texas Instruments (TI).

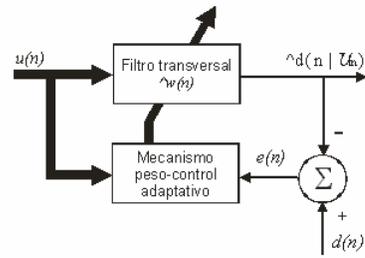


Fig. 6. Diagrama a bloques del filtro LMS adaptable transversal.

III. DESARROLLO

A. Descripción general del sistema.

El sistema de control activo de ruido, que se plantea en este trabajo, consiste de 7 etapas básicas. La figura 7 presenta el diagrama a bloques, donde se aprecian cada una de las etapas que lo componen.

La primera etapa consiste en la detección del ruido, para lo cual se utiliza un micrófono del tipo de condensador, la señal proveniente del micrófono se aplica a una etapa de preamplificación y adecuación para lograr que llegue con el nivel de voltaje adecuado a la siguiente etapa. La tercera etapa consiste de la conversión analógica a digital, esta información es tomada por el DSP el cual se encarga de hacer el procesamiento digital de la señal y generar una salida de acuerdo al algoritmo de control. La salida del DSP es convertida de digital a analógica y aplicada a un preamplificador. El amplificador de audio toma la señal del preamplificador y le da la potencia necesaria para excitar la bocina. La bocina de control convierte la señal eléctrica en ondas sonoras.

B. Sensor

El sensor utilizado es un micrófono de condensador del tipo para computadora, se analizaron otros tipo de micrófonos como los dinámicos de bobina pero complicaban el diseño del preamplificador de entrada, además su tamaño introduce variaciones en la propagación del sonido. En cambio este pequeño micrófono utilizado resulta fácil de montar, ligero y muy económico, siendo esto último un factor importante.

Especificaciones del micrófono.

- ◆ Patrón de direcciones: Omnidireccional.
- ◆ Impedancia de salida: 1.4Ω± 30 %.
- ◆ Frecuencia de respuesta: 50 ~ 13000 Hz.
- ◆ Sensibilidad: -58dB±3dB (0dB=1V/μBar a 1KHz, RL=1KΩ, Vs=3V, T=20°C).
- ◆ Voltaje de operación: 1V ~ 10V (Voltaje estándar: 3V).
- ◆ Consumo ordinario: 350μA máx.
- ◆ Proporción S/N: 40dB o más
- ◆ Largo del cable: 8 pies.

Conector: Plug de micrófono estéreo de 3.5mm.



Fig. 7. Diagrama a bloques del sistema de control activo de ruido acústico.

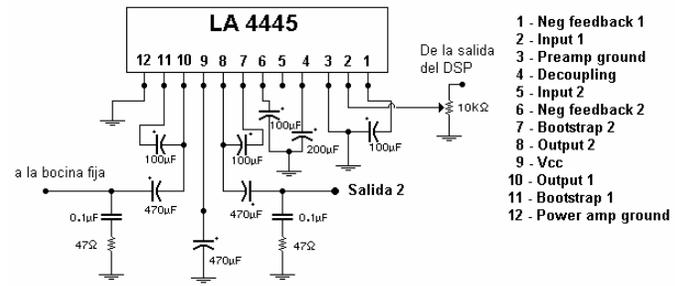


Fig. 9. Diagrama electrónico del amplificador de audio usado.

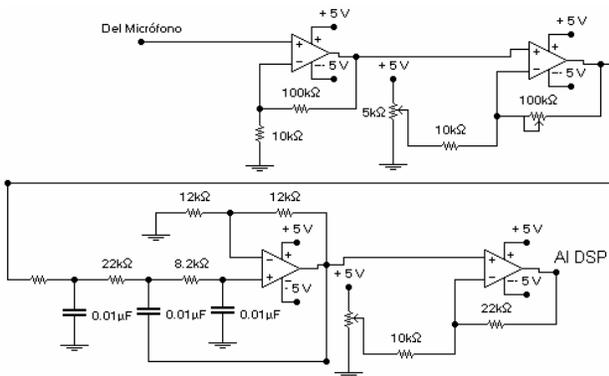


Fig. 8. Diagrama esquemático de la etapa de adecuación para la señal del micrófono.

C. Adecuador.

Para que el DSP pueda utilizar la señal del micrófono, es necesario darle un nivel de voltaje adecuado. Ya que la salida del micrófono es del orden de los 10 a 30 mVpp, es necesario amplificarla para poder excitar el convertidor analógico-digital del DSK. Para no saturar la entrada se debe cuidar que la excursión de la señal no pase del nivel $V_{dd}+0.3V$ [7]. Como se utiliza una alimentación $V_{dd} = 5V$, los Op-Amp's deben manejar 4.5 Vpp. Basado en lo anterior se diseñó el siguiente circuito adecuador, ver figura 8, que consiste de tres amplificadores en configuración no inversora, y con ajuste del nivel de offset, más un filtro pasa bajas de tercer orden, con frecuencia de corte a 1KHz.

D. Actuador (Bocina)

Como fuente secundaria y de control se utiliza una bocina circular con las siguientes especificaciones:

- ◆ Diámetro: 10 cm.
- ◆ Impedancia: 8 Ohms
- ◆ Potencia máxima: 10 W

La selección de la bocina se hizo tomando en cuenta que debe reproducir frecuencias bajas. Se hicieron pruebas con bocinas de menor diámetro y menor potencia, pero se observó que el nivel de voltaje producido en el micrófono para una distancia de 70 cm es muy pequeño y es necesario que los niveles que provoca la fuente primaria sean comparables a los logrados por el conjunto DSP-Amplificador-Bocina. Para mejorar el desempeño de la bocina se colocó en una caja acústica.

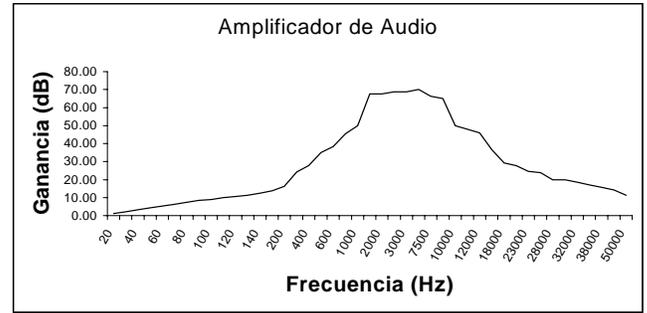


Fig. 10. Respuesta en frecuencia del amplificador de audio.

E. Amplificador de Audio.

Un amplificador de audio es necesario ya que el DAC conectado al DSP, genera una señal de salida de muy poca potencia que es incapaz de excitar la bocina de control. El amplificador de audio, además de darle la potencia necesaria, debe hacerlo sin distorsionar la forma de onda generada por el DSP. Para realizar esta función se utiliza un circuito integrado LA4445 que es económico, fácil de conseguir y se utiliza en una configuración muy sencilla de pocos elementos externos. La figura 9 muestra el diagrama electrónico del amplificador de audio LA4445 utilizado.

La respuesta en frecuencia de este amplificador (obtenida en el laboratorio) se muestra en la figura 10

F. Módulo de desarrollo del DSP TMS320C50.

El procesamiento digital de la señal se realiza con un módulo de desarrollo de Texas Instruments, ver figura 11. Este módulo incluye el DSP. Incluye también la interfaz analógica TLC32040C, que contiene en un solo encapsulado un ADC y un DAC, configurables por software a través de un puerto serie que se conecta al DSP, entre otras características posee una entrada normal y una auxiliar, pero sólo es posible configurarlo para utilizar una entrada a la vez, es decir, dentro del programa principal no es posible cambiar de una entrada a otra.

G. Aproximación Feedback

El diagrama a bloques de la configuración Feedback implementada se presenta en la figura 12, donde se aprecia que la señal tomada por el micrófono pasa a través de un filtro adaptable transversal de respuesta finita al impulso (FIR).

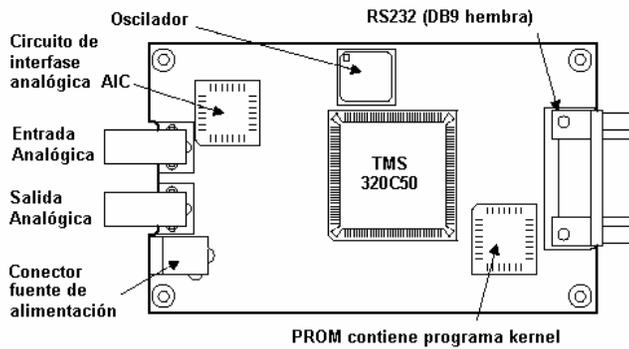


Fig. 11. Principales componentes del módulo de desarrollo para el DSP TMS320C50.

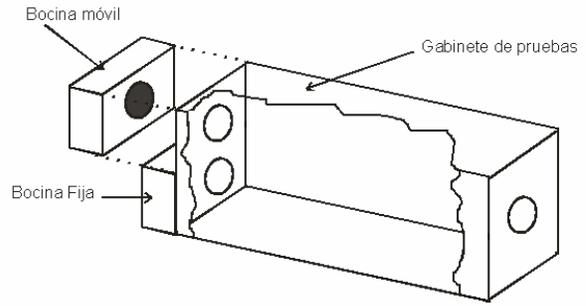


Fig. 14. Gabinete de pruebas acústicas.

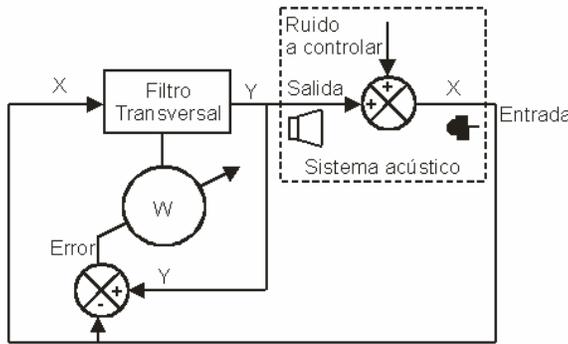


Fig. 12. Diagrama a bloques de la configuración Feedback.

Es notable que en esta configuración el sistema de control desconoce por completo el comportamiento del sistema, es decir, no toma en cuenta ninguna función de transferencia, el algoritmo de mínimos cuadrados (LMS) ajusta los coeficientes del filtro transversal $W(n)$, tratando de disminuir el error, logrando así reproducir la forma de onda detectada y enviarla a la salida, pero con signo contrario.

G. Implementación de la aproximación Feedback en el DSP

El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la figura 12.

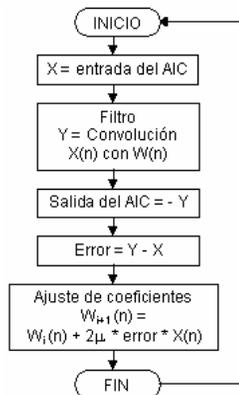


Fig. 13. Diagrama de flujo del algoritmo para la configuración Feedback.

IV. RESULTADOS

Buscando que todas las pruebas se realizaran bajo las mismas condiciones, se construyó un gabinete acústico. Este gabinete construido en madera, tiene una forma rectangular, las dimensiones físicas son: 30 x 40 x 90 cm, cuenta con un par de bocinas montadas en cajas acústicas independientes. Una de las bocinas es fija y está montada a un costado en la parte inferior, la otra bocina es móvil. La figura 14 muestra el detalle del gabinete de pruebas acústicas construido.

El micrófono se introduce dentro del gabinete, también es posible moverlo, buscando realizar pruebas con el micrófono a diferentes distancias de la fuente primaria.

Se documentaron en total un conjunto de 106 pruebas agrupadas en 6 tablas, de acuerdo a la ubicación y orientación que guardaban entre sí la bocina y el micrófono; y el número de taps usados en el filtro adaptable del control. Se midió directamente el nivel de ruido detectado por el micrófono para un conjunto de valores de ruidos tonales (de una sola frecuencia, o de un ancho de banda muy reducido) en el rango de 20 a 600Hz, que es un rango mayor que el ancho de banda de ruido a eliminar; antes y después de poner en funcionamiento el control activo de ruido, y se procedió a calcular los niveles de atenuación presentados. En la columna de observaciones se incluyeron (cuando se consideró importante), algunos de los emitidos por un auditorio de 10 personas (en promedio) acerca del desempeño del control de ruido, basados en su opinión perceptual.

Se hace notar que en algunas de las combinaciones de orientación de bocina y micrófono, el algoritmo tenía un comportamiento inestable, ya que mostraba una salida oscilatoria de magnitud creciente.

A continuación se muestran dos tablas que recopilan algunas de las pruebas más interesantes realizadas al sistema:

V. CONCLUSIONES

Este trabajo representa un primer paso para lograr la meta final de eliminar el ruido de fondo producido por los aires acondicionados de ventana, que afecta la comunicación verbal en los salones de clase.

Con respecto al sistema acústico, micrófono-bocina, se debe considerar que la bocina de control debe lograr los mismos niveles de voltaje en el micrófono, que el ruido no deseado, sin control.

TABLA 1. BOCINA A FAVOR, MICRÓFONO 30CM, 128 TAPS.

Control Activo de Ruido				
Frecuencia (Hz)	Nivel en micrófono S/Control (Vpp)	Nivel en micrófono C/Control (Vpp)	Atenuación (dB)	Observaciones
20	-	-	-	-
30	-	-	-	-
40	-	-	-	-
50	-	-	-	-
60	0.4	0.4	0.00	Distorsion
70	0.8	1.2	3.52	Distorsion
80	0.2	0.2	0.00	Distorsion
90	1.32	1.2	-0.83	
100	0.40	0.40	0.00	
120	0.60	0.40	-3.52	
140	0.60	0.40	-3.52	Distorsion
160	0.80	0.36	-6.94	
180	1.44	0.80	-5.11	
200	1.20	1.20	0.00	
220	0.60	0.80	2.50	
240	-	-	-	Inestable
260	0.20	0.24	1.58	
280	0.28	1.70	15.67	
300	0.24	0.58	7.66	
350	0.12	0.16	2.50	
400	0.24	0.20	-1.58	
450	0.18	0.08	-7.04	
500	0.24	0.20	-1.58	
550	0.16	0.12	-2.50	
600	0.28	0.32	-	

TABLA 2. BOCINA EN CONTRA, MICRÓFONO AL CENTRO, 128 TAPS.

Control Activo de Ruido				
Frecuencia (Hz)	Nivel en micrófono S/Control (Vpp)	Nivel en micrófono C/Control (Vpp)	Atenuación (dB)	Observaciones
20	-	-	-	-
30	-	-	-	-
40	-	-	-	-
50	-	-	-	-
60	0.40	0.40	0.00	
70	0.24	0.24	0.00	
80	0.24	0.24	0.00	
90	0.16	0.16	0.00	
100	0.52	0.52	0.00	
120	0.28	0.24	-1.34	
140	0.72	0.60	-1.58	
160	0.32	0.20	-4.08	
180	1.50	1.50	0.00	
200	1.48	1.40	-0.48	
220	0.72	1.08	3.52	
240	1.70	2.00	1.41	
260	1.20	1.08	-0.92	
280	0.72	0.72	0.00	
300	0.56	0.60	0.60	
350	0.56	0.60	0.60	
400	1.70	1.00	-4.61	
450	0.40	1.00	7.96	
500	0.36	0.40	0.92	
550	0.20	0.20	0.00	
600	0.12	0.16	2.50	

La configuración Feedback, se presenta un retardo de la señal de salida del DSP con respecto a la señal de ruido a controlar, por esto, no se elimina totalmente el ruido.

Con la bocina de control en contra, se logran áreas con una relación de amplitud y frecuencia de la señal de ruido (de menor tamaño) donde se obtiene una disminución casi total del mismo, pero es notable que el tiempo que lleva lograrlo es mucho mayor.

También se colocó un segundo micrófono para observar la zona de silencio formada, para una frecuencia de 166 Hz, cuya longitud de onda es de 1.49 m, calculada para una velocidad del sonido de 248m/s a una temperatura de 27 °C, se realizaron mediciones desde 8 hasta 16 cm en las cuales no se detectó señal (0 mV medidos en el micrófono), por lo que se consideró como zona de silencio. Por lo que la zona de silencio formada alrededor del micrófono de error fue mayor de un décimo de la longitud de onda (14.9 cm) que era el máximo, que de acuerdo a la teoría se podía conseguir con un control activo de ruido[5].

A su vez, para futuros trabajos se recomienda:

Implementar un sistema de control que incluya un arreglo de bocinas y micrófonos que primeramente utilice un algoritmo que realice un control de manera independiente para cada uno de ellos, y posteriormente se realice otro algoritmo de control donde se interrelacionen entre ellos.

Utilizar un filtro IIR en vez de un FIR, en la estructura adaptable.

Utilizar una configuración Feedforward, con la que se pueda eliminar el retardo presentado en la configuración Feedback, y lograr así una eliminación perceptual total del ruido acústico.

REFERENCIAS

- [1] L. Rodríguez y H. Vallejo, Curso completo de audio y HI-FI, p. 5
- [2] C. Harris, Manual de medidas acústicas y control del ruido, p. 1.2
- [3] A. Efron, El mundo del sonido, Argentina, p. 63
- [4] J. Atrio, Eliminación activa del ruido en sistemas de aire acondicionado, Internet, www.tsc.uvigo.es/~jatrio/proyecto.htm
- [5] P. Cobo P., Control activo de ruido de baja frecuencia en el instituto de acústica del CSIC, España, Internet, <http://www.ia.csic.es/Ambiental/Antirruido/publicacion.htm>
- [6] Saposhkov, M. A., Electroacústica, España, p.73
- [7] Texas Instruments, TMS320C5X DSP Starter Kit User's Guide, p. B18
- [8] Widrow, B., Glover, J. R., Jr., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hearn, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E., and Goodlin, R. C., 1975, Adaptive noise cancelling: Principles and applications: Proc. IEEE, 63, 1692-1716.
- [9] B. Widrow, E. Walach., Adaptive Inverse Control, Prentice Hall, EUA 1996. Páginas 40 a 45.

Andrés O. Pizarro L. (1973). Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Durango, en 1995. Realizó estudios de posgrado en Ingeniería Eléctrica en control en el Instituto Tecnológico de La Laguna de 1995-1997. De enero de 1998 a la fecha se desempeña como profesor-investigador de tiempo completo del dpto. de Ing. Eléctrica del ITSON. Ha dirigido 15 tesis de licenciatura. Sus áreas de interés incluyen procesamiento digital de señales y la implementación de sistemas de control utilizando DSP's.

Eduardo Romero A. (1972). Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica opción Instrumentación en el Instituto Tecnológico de Orizaba en 1995, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el área de Sistemas Digitales, en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - CENIDET de Cuernavaca, Morelos, México en 1999. Ha realizado diversos proyectos relacionados con sistemas de adquisición de datos. Actualmente labora como profesor-investigador de tiempo completo, con perfil PROMEP, en el Dpto. de Ing. Eléctrica del Instituto Tecnológico de Sonora.