

## CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN UN AUTOMOVIL

Ref. PACS: 4350

Antonio Mínguez<sup>1,2</sup>, Manuel Recuero<sup>1,3</sup>, Juan Sancho Gil<sup>1,2</sup> y José Luis Pascual<sup>4</sup>

*Instituto de Investigación del Automóvil<sup>1</sup> (INSIA)*  
*Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones<sup>2</sup>*  
**Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación<sup>3</sup>**  
*Universidad Politécnica de Madrid (UPM)*  
**Ctra. Valencia km. 7, 28031 Madrid (SPAIN)**  
*Grupo Antolín, Ctra. Madrid-Irún km. 244.8, Burgos (SPAIN)<sup>4</sup>*  
*Tel.:+34-913367796, Fax: +34-913367784, [aminguez@diac.upm.es](mailto:aminguez@diac.upm.es)*

### Abstract.

A dual channel active noise control system has been implemented in order to attenuate the low frequency component of the engine noise around the front headrests. This low frequency component ranges from 90 to 150 Hz for 2.700-4.500 rpm. The controller has been specifically developed for this application on the low cost DSP board EZ-KIT Lite of Analog Devices, extended with two new Codecs AD1847 to get a multichannel configuration. Three different adaptive algorithms have also been developed to get multiple options for the control system: the classical filtered-X LMS, the delayed-X notch LMS and a simple genetic (random search) algorithm. The best results were obtained with the filtered-X LMS (attenuation and fast convergence). The rest of the control system consists of inexpensive electret microphones with a good frequency response (50-8000 Hz) to get the sound pressure level around the headrests, two speakers located in the front doors of the car and a dual channel audio amplifier.

### INTRODUCCIÓN. EL SISTEMA DE CONTROL.

El control activo de ruido es una técnica que se está aplicando con éxito desde hace unos años [1,2], para mejorar los resultados que ofrecen las técnicas pasivas de control (materiales absorbentes y aislantes) en bajas frecuencias. En este artículo se presenta la implementación de un sistema de control con objeto de atenuar la componente periódica de baja frecuencia debida al ruido del motor. Esta componente, entre 90 y 150 Hz, puede llegar a tener un valor importante cuando coincide con la frecuencia de resonancia del habitáculo, produciendo una sensación bastante molesta para el pasajero. El sistema de control generará dos zonas virtuales de atenuación alrededor de cada uno de los reposacabezas delanteros. Los altavoces situados en el interior de las puertas delanteras del vehículo generarán ondas de presión acústica, de tal forma que estén en contrafase con las existentes debidas al ruido del motor, justamente alrededor de los reposacabezas. Un controlador electrónico, basado en un procesador digital de señales, será el encargado de producir las variaciones de amplitud y fase de forma dinámica, de acuerdo con una señal de referencia obtenida del propio motor y de dos señales de realimentación suministradas por dos micrófonos, situados en los reposacabezas. Un amplificador de potencia será el nexo de unión entre las señales generadas por el controlador y los altavoces encargados de transformarlas



en ondas de presión. Obviamente, la ganancia del amplificador será suficiente para producir ondas de presión de nivel equiparable al inicialmente existente.

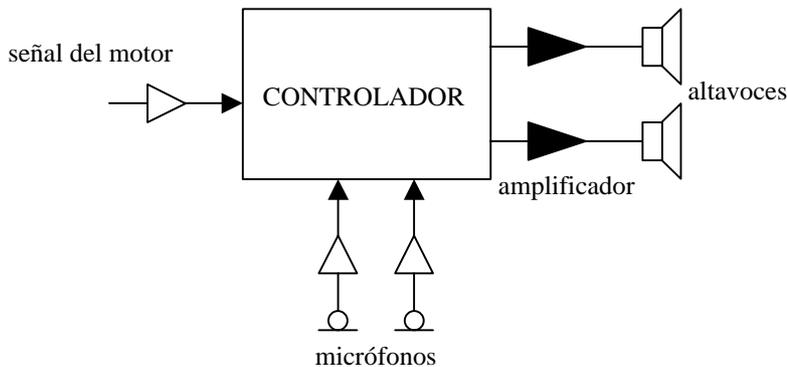


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control activo de ruido.

La bondad del sistema de control depende de la fidelidad de las señales con respecto a las ondas de presión que representan [3]. En este sentido, los transductores y el amplificador de audio han de tener buenas características en el margen de frecuencias de interés (al menos hasta 200 Hz), en términos de S/N (relación señal/ruido), distorsión y respuesta en frecuencia (amplitud y fase). Por ejemplo, los micrófonos que pueden utilizarse son de tipo electret, de coste mínimo. En cuanto a la señal de referencia obtenida del motor existen varias alternativas: utilizar un micrófono, un acelerómetro o un tacómetro. Lo más aconsejable es utilizar la señal que se entrega al propio cuenta-revoluciones del coche, acondicionada convenientemente a las características de entrada de nivel del controlador. Las otras dos opciones no suelen ser prácticas. El micrófono ha de soportar unas condiciones de trabajo muy severas (temperatura, suciedad, corrosión, etc.) y esto hace que se pierda rápidamente las características iniciales del micrófono. La desventaja del acelerómetro es su precio y puede hacer económicamente inviable el prototipo.

La zona virtual de atenuación tiene unas dimensiones de aproximadamente una esfera de diámetro la décima parte de la longitud de onda [4]. Por ejemplo, para 100 Hz esta zona de atenuación es de 34 cm., y se reduce drásticamente conforme se aumenta en frecuencia, de aquí que el margen de frecuencias de trabajo para las técnicas de control activo de ruido no supere los 500 Hz. Aún así, las dimensiones de atenuación pueden aumentarse colocando dos zonas de cancelación próximas, convirtiéndose las dos esferas virtuales de atenuación en una elipsoide de ejes  $\lambda/2$  y  $\lambda/10$ , aproximadamente [5].

La ubicación de los elementos transductores también condiciona la atenuación final obtenida. Ha de realizarse un estudio exhaustivo de optimización de la atenuación en función de las diferentes posiciones de los altavoces y de los micrófonos [6]. En un vehículo no existen muchas alternativas de ubicación de los mismos. En nuestro caso se han fijado las dos posiciones de los altavoces a las que traía el propio coche. En cuanto a la ubicación de los micrófonos se hizo un análisis para determinar las mejores posiciones en cada uno de los entornos de los reposacabezas [7].

## EL CONTROLADOR ELECTRÓNICO

El controlador electrónico está basado en una tarjeta de procesamiento digital de señales en tiempo real, capaz de producir el control necesario ante situaciones cambiantes del entorno de cancelación. Produce las variaciones de amplitud y fase, en la señal de referencia, para optimizar en todo momento la atenuación acústica.

La tarjeta de procesamiento de señal utilizada es un kit de bajo coste (89\$ USA) de Analog Devices [8] que permite realizar cualquier aplicación de procesamiento de señal (figura 2). Consta de un procesador digital de señales (DSP), el procesador ADSP-2181, y un CODEC estéreo de entrada/salida, encargado de convertir las señales



analógicas de los sensores en secuencias numéricas de datos y convertir nuevamente los datos procesados en señales analógicas de salida, aplicables a las entradas del amplificador de potencia.

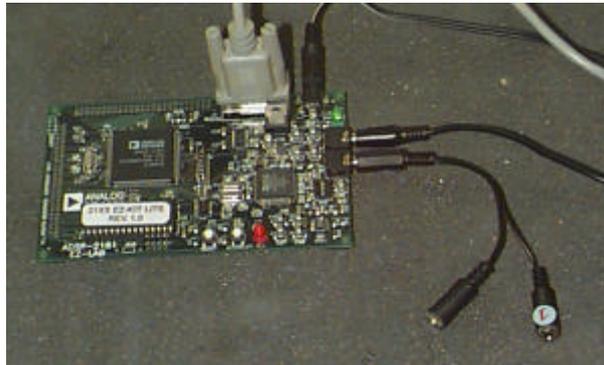


Figura 2. Tarjeta EZ-KIT Lite de Analog Devices.

Todo el código que realiza el sistema de control se carga en la memoria del procesador mediante un puerto serie RS-232 conectado a un ordenador PC (fase de prueba). Una vez optimizado el código para la aplicación concreta, en este caso el controlador trabajando en el habitáculo del vehículo en las condiciones reales de funcionamiento, se graba en una memoria EPROM, incluida en la propia tarjeta, para que el sistema funcione de forma independiente del ordenador PC (prototipo final). Los niveles de las señales de entrada de los sensores pueden ser tanto de nivel de micrófono como de nivel de línea (existe un *switch* para cada uno de los dos canales de entrada). En nuestro caso, se trabaja con señales microfónicas en los sensores de error y con una señal con nivel de línea entregada por el tacómetro del coche.

La tarjeta anterior solo permite implementar un sistema de control activo monocal: dos entradas, una señal de referencia y una señal de error, y dos salidas, de las cuales sólo se utiliza una para la señal de control que irá al amplificador de potencia y luego al altavoz.

El sistema de control que se va a implementar en el coche es un sistema de doble canal: dos señales de salida de control, aplicadas a dos altavoces, una señal entrada de referencia del ruido del motor y dos o cuatro señales más de entrada, provenientes de los micrófonos de error, donde el controlador creará zonas de atenuación acústica. Para procesar todas estas señales es necesario disponer de al menos dos tarjetas de EZ-KIT trabajando de forma independiente (caso de sólo dos señales de error), atenuando cada una de ellas una zona del interior del coche. Otra opción es utilizar una tarjeta de procesado multicanal que admita al menos dos señales de salida y hasta cinco señales de entrada (caso de cuatro señales de error y una señal de referencia), trabajando de forma acoplada, es decir, realizando una atenuación conjunta de las 4 posibles zonas de control (donde estén colocados los micrófonos de error).

Tomando como base la tarjeta EZ-KIT de Analog Devices se ha diseñado e implementado una ampliación de la misma para que admita, tanto en la entrada como en la salida, hasta diez señales. Las señales de entrada, admiten tanto nivel de línea como nivel de micrófono. En el caso de señales de micrófono, las entradas de la tarjeta están preparadas para inyectar una tensión de polarización a los micrófonos *electret*, simplificando de esta forma el diseño de los sensores.



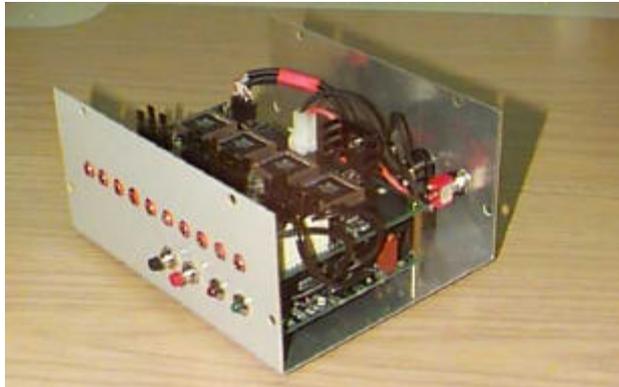


Figura 3. Tarjeta multicanal (10 canales) de procesamiento digital de señales.

## LOS ALGORITMOS DE CONTROL

Tres algoritmos adaptativos de control han sido desarrollados e implementados para evaluar la bondad de los mismos para la aplicación concreta de cancelación del tono fundamental del régimen de vueltas del motor. Estos algoritmos son:

- Algoritmo adaptativo de entrada filtrada LMS [9] (figura 4)
- Algoritmo adaptativo de entrada filtrada notch LMS [10] (figura 5)
- Algoritmo genético [11] (figura 6)

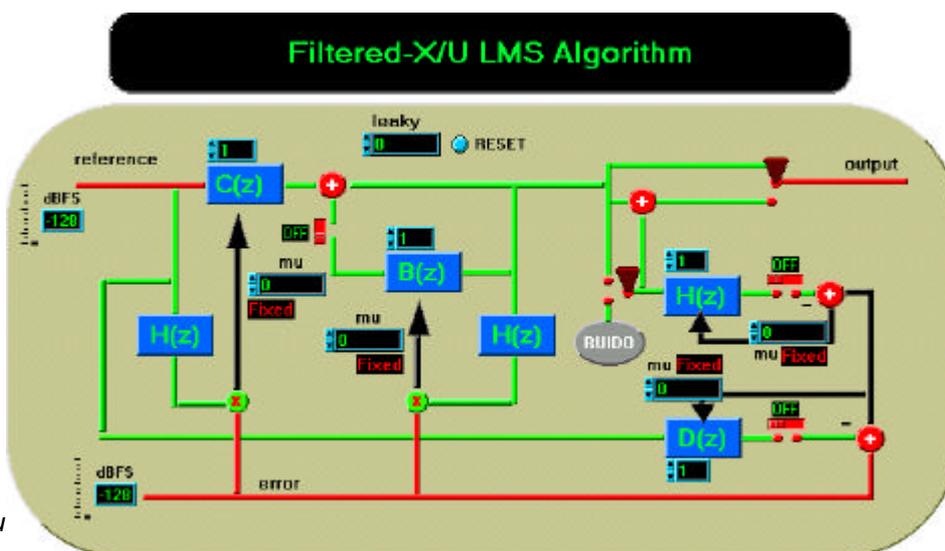


Figura 4.

Los dos primeros requieren para su estabilidad la estimación de las funciones de transferencia que ligan las dos



señales de salida del controlador con las señales de entrada de los micrófonos. Estas estimaciones se realizan dinámicamente, en tiempo real, al mismo tiempo que lleva a cabo la cancelación. Por el contrario, el algoritmo genético realiza una búsqueda aleatoria, emulando las leyes evolutivas biológicas, con un funcionamiento más lento pero más robusto que los anteriores.

El algoritmo notch sólo se utiliza para atenuar componentes espectrales fijas, son filtros acústicos muy selectivos situados en las frecuencias donde se obtienen los picos más altos del espectro de ruido. El algoritmo más versátil y el que mejores prestaciones presenta, tanto en velocidad de adaptación como en atenuación conseguida, es el algoritmo adaptativo de entrada filtrada.

Los parámetros de funcionamiento de cada uno de ellos se obtienen después de un laborioso trabajo de simulación, laboratorio y de campo en el propio vehículo. Determinan la estabilidad de funcionamiento y la máxima atenuación acústica para diferentes regímenes de vueltas.

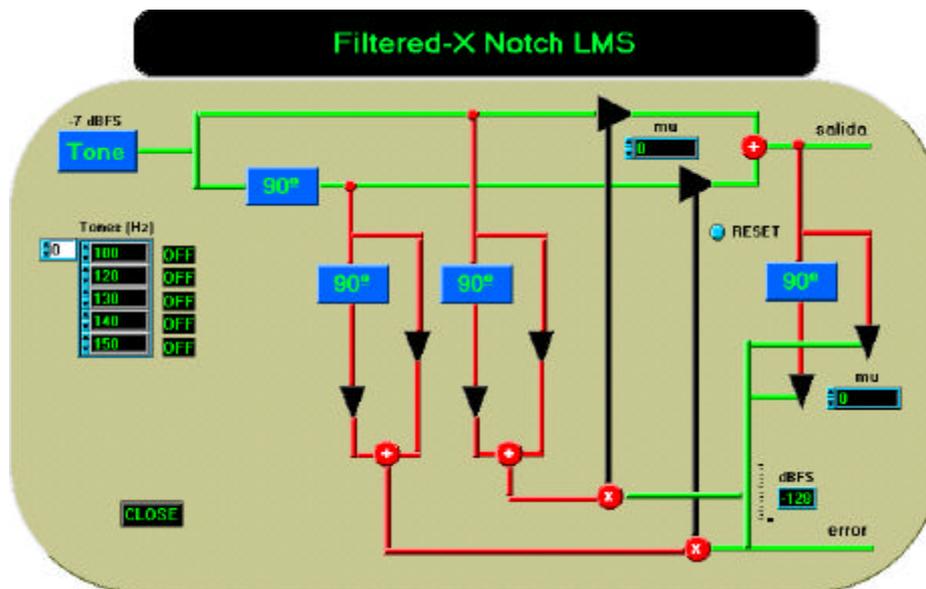


Figura 5. Algoritmo adaptativo de entrada filtrada notch LMS.

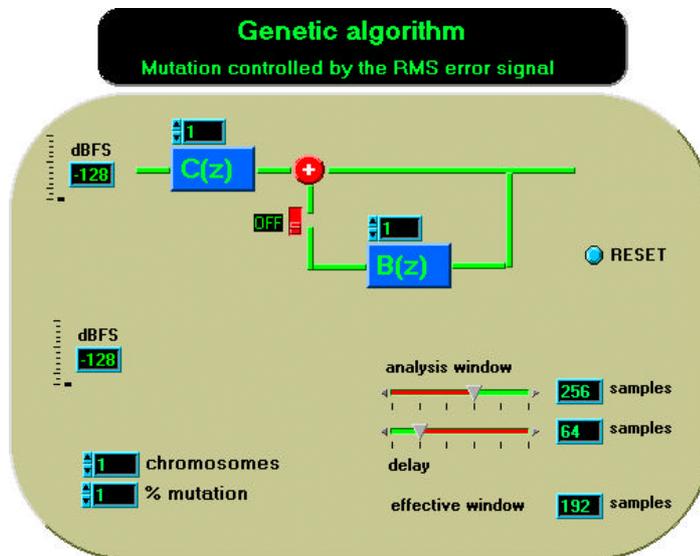


Figura 6. Algoritmo genético con mutación controlada por la señal de error.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De los tres algoritmos adaptativos utilizados únicamente el algoritmo adaptativo de entrada filtrada se muestra como realmente eficaz para realizar la cancelación de la componente tonal proporcional al régimen de vueltas del motor. Es necesario realizar un acondicionamiento de las señales que entran y salen del controlador, tanto en nivel como de filtrado espectral, para que el algoritmo funcione siempre en las mismas condiciones. De lo contrario, pueden producirse inestabilidades o pérdidas de control manifestándose como un aumento global del ruido. La cancelación sólo se produce aproximadamente a partir de las 3.000 vueltas, percibiéndose como ligera sensación de confort (no de cancelación acústica) al eliminarse la baja frecuencia del motor. En la figura 7 se muestra de forma gráfica en el espectro de frecuencias la atenuación obtenida para un régimen de 3.450 vueltas.

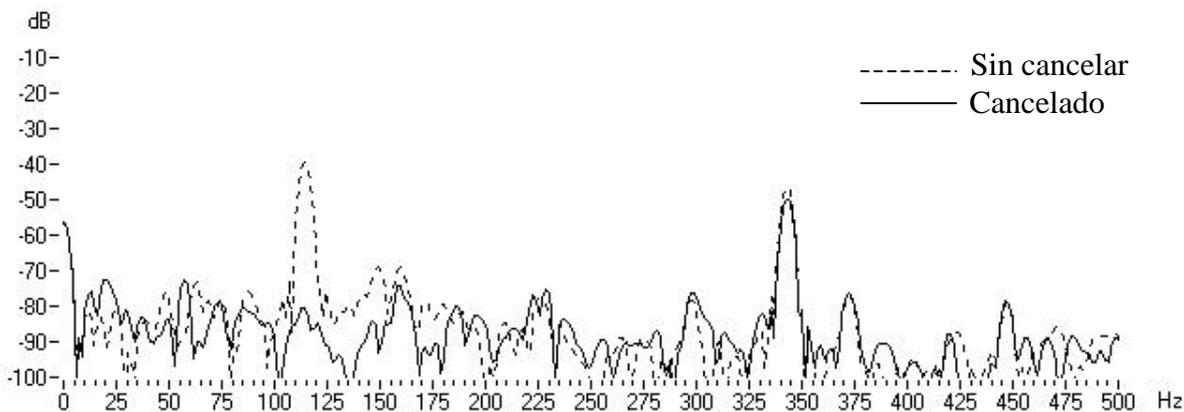


Figura 7. Espectros del ruido antes y después de producirse la cancelación (3.450 rpm. del motor). Algoritmo de entrada filtrada LMS.



## REFERENCIAS

- [1] Elliot S.J. and Nelson P.A., "Active noise control," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 12-35, October 1993.
- [2] Eriksson L.J. and Allie M.C., "A Practical System for Active Attenuation in Ducts", *Sound and Vibration*, February 1988.
- [3] Hansen C.H., "Current Research in Active Control of Noise", *International Sound and Vibration Digest*, Nov. 1994.
- [4] Joseph P., Elliott S.J., and Nelson P.A., "Active Cancellation at a Point in a Pure Tone Diffuse Sound Field, Zones of Silence and Potencial Energy Statistics", *Proc. of Inter-Noise 88*, pp. 971-974, 1988.
- [5] Garcia-Bonito J. and Elliott S.J., "Strategies for Local active Control in Diffuse Sound Fields", *Proc. of ACTIVE 95*, pp. 561-572, July 1995.
- [6] Ruckman C.E. and Fuller C.R. "Optimising actuator locations in feedforward active control systems using sub-set selection", *Proceedings of 2nd conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, Virginia Tech., pp. S122-S133, 1993.
- [7] Ulin V., Mínguez A. and Recuero M., "Optimization of the error microphones locations of an active noise control system for reducing the engine noise inside an automobile", *Proc. of Active 99*, Fort Lauderdale, Florida, USA, Dec. 6-8, 1999 (accepted paper).
- [8] 'EZ-KIT Lite', Analog Devices, 1996.
- [9] Elliott S.J. et al., "A multiple error LMS algorithm and its application to the active noise control od sound and vibration", *IEEE Trans. on ASSP*, ASSP-35, 1987, pp. 1423-1434.
- [10] Mínguez A. and Recuero M., "A Filtered-X Adaptive Notch Filter with On-line Cancellation Path Estimation", *Fifth International Congress on Sound and Vibration*, Adelaida (AU), Dec. 1997, pp. 1171-1178.
- [11] Mínguez A. and Recuero M., "A Simple Genetic Algorithm for Active Noise Control", *ICA-ASA 98*, Seattle (USA) Jun. 98, pp. 289-290.

