

FXECLMS Algorithm for Active Acoustic Windows: An Experimental Report

A. Vázquez, X. Maya, A. Fernández, G. Avalos, G. Sánchez, J. Sánchez, and H. Perez, *Senior Member, IEEE*

Abstract—Active noise control (ANC) systems have become attractive solution for controlling the environmental noise in open windows. However, few works have demonstrated the benefits of using ANC systems in active acoustic windows since their implementation depends on several variables, such as the control source configuration (quantity and position of speakers), the adaptive control algorithm and the computational capabilities of the embedded devices. Specifically, the computational complexity of the adaptive control plays an important role in the development of practical real-time ANC applications. Until date, several works have presented theoretical models for ANC systems. Nevertheless, they do not consider the computational capabilities of the embedded devices to efficiently implement their adaptive algorithms, which limits its use in practical ANC applications. This paper presents for the first time a multichannel adaptive algorithm based on a filtered-x error coded least mean square (FXECLMS) and its efficient implementation to be used in an open-window ANC system. From the experimental results, we discuss the limitations, challenges and provide potential solutions in practical ANC implementations using advanced embedded devices.

Index Terms—Active noise control, active acoustic windows, FXECLMS algorithm.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el ruido ambiental representa un problema de salud a nivel mundial. Recientemente, el ruido acústico se ha incrementado significativamente por el uso de equipo industrial (motores, ventiladores, extractores, transformadores), medios de transporte (vehículos automotrices, aviones, etc.), entre otros. En particular, un problema de contaminación acústica común es el que se presenta en las casas, edificios, hospitales, oficinas, escuelas, donde el ruido ingresa principalmente a través de las ventanas afectando el ambiente acústico de las habitaciones.

Durante las últimas décadas, el Control Activo de Ruido (CAR) ha surgido como una posible solución al problema de la contaminación acústica en recintos, especialmente para la cancelación de señales de baja frecuencia, comúnmente no mayores a 2 KHz [1,2]. El CAR es una técnica que se basa en el uso de filtros adaptativos para generar una señal anti-ruido, la cual atenúa la señal de ruido mediante el principio de superposición. Diversos autores han propuesto varias técnicas de filtrado adaptativo, sin embargo, un factor que limita el uso de sistemas CAR en aplicaciones prácticas está fuertemente relacionado con la complejidad computacional de los algoritmos, especialmente cuando se requiere procesar sistemas multicanal. Por este motivo, muy pocos algoritmos han sido implementados en dispositivos embebidos, tales como: FPGAs y DSPs [3-12]. Además, la mayoría de estos trabajos están basados en algoritmos adaptativos FXLMS (del inglés: *Filtered-x Least Mean Square*), dado que los algoritmos FXLMS presentan una baja complejidad computacional teniendo como limitante una baja velocidad de convergencia. Sin embargo, para la cancelación de ruido en ventanas, la velocidad de convergencia es una característica sumamente importante. Varios autores han propuesto algoritmos de control adaptativo que poseen velocidades de convergencia elevadas o bajos niveles de desajuste [13-16], sin embargo, estos algoritmos presentan una complejidad computacional muy alta, por lo que resulta inviable su implementación en algún dispositivo embebido. Recientemente, en [17] se propuso el algoritmo de Mínimos Cuadrados Promediados con Error Codificado (ECLMS - *Error Coded Least Mean Square*). El algoritmo ECLMS disminuye considerablemente la carga computacional dado que utiliza un número reducido de operaciones de punto fijo, además, garantiza una alta velocidad de convergencia. Anteriormente, el algoritmo ECLMS ha sido utilizado para la implementación de un sistema CAR de un solo canal en un ducto [18], el cual presento resultados favorables.

Este trabajo presenta una nueva versión del algoritmo ECLMS para ser aplicado a sistemas multicanal de manera eficiente. La versión que se propone demanda una complejidad ligeramente superior a la versión original, sin embargo, conserva una alta velocidad de convergencia. Además, se presentan los aspectos prácticos en la realización de un sistema CAR multicanal con el fin de reducir el ruido en una ventana. También, se presentan algunas técnicas de programación para la implementación eficiente del algoritmo ECLMS en un DSP. Los resultados han demostrado que la

A. Vázquez is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: vapa1995@hotmail.com).

X. Maya is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: xomaro94@hotmail.com).

J. G. Avalos is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: javaloso@ipn.mx). *Corresponding author*

G. Sánchez is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: giovas666@hotmail.com).

A. Fernández is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: beat.mind@hotmail.com).

J. C. Sánchez is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: jcsanchezgarcia@gmail.com).

H. M. Pérez is with the Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan, Ciudad de México, México (e-mail: hmperez@mipn.mx).

baja complejidad computacional junto con las técnicas de programación adecuadas permite desarrollar sistemas CAR garantizando una cancelación de ruido efectiva.

II. ALGORITMO DE MÍNIMOS CUADRADOS PROMEDIADOS CON ERROR CODIFICADO

El algoritmo ECLMS reduce las operaciones de punto flotante mediante un proceso de codificación de la señal de error. Además, no actualiza sus coeficientes durante todo el proceso de adaptación debido a que el cómputo del algoritmo solamente se realiza cuando la señal de error es mayor a un umbral previamente establecido, por lo tanto, la carga y el costo computacional se reducen considerablemente [17].

La ecuación de actualización de coeficientes $\mathbf{w}(n)$ del algoritmo ECLMS se muestra en (1).

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu C[e(n)]\mathbf{x}(n) \quad (1)$$

Donde $\mathbf{x}(n)$ es la señal de entrada, μ el tamaño del paso o factor de convergencia y $C[e(n)]$ es el error codificado. En este algoritmo el número de operaciones de punto flotante disminuye debido a que la multiplicación entre el error codificado, $C[e(n)]$, y la señal de entrada, $\mathbf{x}(n)$, es una operación de números enteros.

El proceso de codificación se realiza aplicando un método de cuantización en la señal de error, posteriormente se asigna un código a la muestra cuantizada. Este proceso se realiza mediante:

$$C[e(n)] = \text{round}\left(\frac{Q[e(n)]}{Res}\right) \quad (2)$$

Donde $Q[e(n)]$ es la cuantización del error, Res la resolución del codificador y round es la función que realiza el redondeo del resultado de la división entre ambos, la resolución es calculada con:

$$Res = \frac{e_{max}}{2^b - 1} \quad (3)$$

Siendo e_{max} el error máximo probable y b el número de bits utilizados para codificar la señal de error. Dado que se desconoce el error máximo, se hace una estimación a partir de la amplitud máxima de la señal de entrada del filtro adaptativo, la cual no llega a ser mayor del 90%. Con el uso de una mayor cantidad de bits en el proceso de codificación, se obtendrá una mejor resolución y así una velocidad de convergencia más alta. Sin embargo, el proceso de codificación altera directamente el valor del factor de convergencia. Para analizar este caso, sustituimos el proceso de cuantización del error en el algoritmo LMS, obteniéndose:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \left(\text{round}\left(\frac{Q[e(n)]}{Res}\right) \right) \mathbf{x}(n) \quad (4)$$

Sustituyendo el valor de la resolución (3) en (4), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \left(\text{round}\left(\frac{2^b - 1}{e_{max}} Q[e(n)]\right) \right) \mathbf{x}(n) \quad (5)$$

De la ecuación (5) se observa que la magnitud del error y el factor de convergencia se incrementan, por lo tanto, para evitar un valor muy elevado de factor de convergencia es necesario no utilizar un número muy alto de bits, de lo contrario la velocidad será tan alta que puede provocar que el algoritmo diverja.

Conforme el proceso de adaptación avanza la señal de error es minimizada, de tal manera que la función round ajusta los valores a cero, adquiriendo un comportamiento como los algoritmos de signo, por lo tanto, si la señal de error se mantiene en ese valor no es necesario actualizar los coeficientes del filtro, dicho proceso se muestra en (6).

$$\mathbf{w}(n+1) = \begin{cases} \mathbf{w}(n) & \text{si } C[e(n)] = 0 \\ \mathbf{w}(n) + \mu C[e(n)]\mathbf{x}(n) & \text{si } C[e(n)] \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

El proceso de codificación de la señal de error implica el cómputo de dos divisiones, una suma y la ejecución de la función de redondeo, por lo que la complejidad computacional del algoritmo ECLMS es ligeramente mayor con respecto a la versión convencional del algoritmo LMS. Sin embargo, el uso del umbral establecido en la ecuación (6) provoca que el valor del coeficiente no se actualice en todas las iteraciones del proceso de adaptación, reduciendo así la carga computacional en el procesador en el que se implemente el algoritmo.

III. ALGORITMO ECLMS CON FILTRADO - X PARA SISTEMAS CAR MULTICANAL

En este trabajo se presenta por primera vez el algoritmo ECLMS para sistemas multicanal dado que se requiere de varios sensores para llevar a cabo una reducción efectiva del ruido en una ventana. Para esta aplicación se utiliza la estructura de filtrado-x para compensar los efectos provocados por el camino secundario. La estructura general de un sistema CAR multicanal se muestra en la Fig. 1. Los bloques p y s representan la trayectoria primaria y la trayectoria secundaria, respectivamente, K es el número de sensores de error, J el número de actuadores (bocinas canceladoras), $x_i(n)$ es la i -ésima señal de referencia obtenida por I sensores de referencia y $y_j(n)$ es la salida del filtro adaptativo definida por:

$$y_j(n) = \mathbf{w}_{ji}^t(n) \mathbf{x}_i(n) \quad (7)$$

La señal de referencia se define como:

$$\mathbf{x}_i(n) = [x_i(n) \quad x_i(n-1) \quad \cdots \quad x_i(n-N+1)]^t \quad (8)$$

y los coeficientes del filtro adaptativo se expresan como:

$$\mathbf{w}_{ji}(n) = [w_{j,i,1}(n) \quad w_{j,i,2}(n) \quad \cdots \quad w_{j,i,N}(n)]^t \quad (9)$$

Donde N es la longitud del filtro adaptativo. Para compensar los efectos causados por el camino secundario

$\mathbf{s}_{jk}(n)$, la señal de referencia $x_i(n)$ es filtrada utilizando la siguiente expresión:

$$x'_{ijk}(n) = \hat{\mathbf{s}}_{jk}^t(n) \mathbf{v}_i(n) \quad (10)$$

Donde $\hat{\mathbf{s}}_{jk}(n)$ es un filtro FIR fijo de longitud M que modela $\mathbf{s}_{jk}(n)$ y $\mathbf{v}_i(n) = [x_i(n) \ x_i(n-1) \ \dots \ x_i(n-M+1)]^t$.

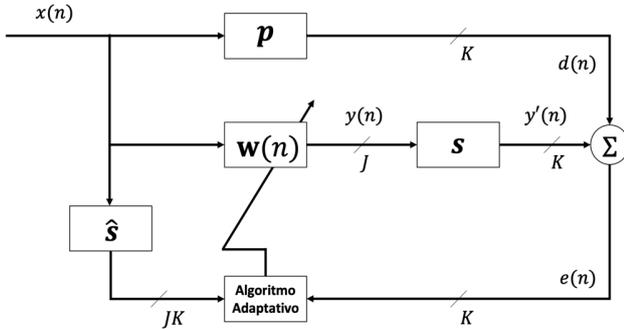


Fig. 1 Diagrama a bloques de la estructura general de filtrado-x multicanal para el control activo de ruido.

La ecuación para la actualización de los coeficientes del algoritmo FXECLMS se expresa como:

$$\mathbf{w}_{ji}(n+1) = \mathbf{w}_{ji}(n) + \mu \sum_{k=1}^K x'_{ijk}(n) C[e_k(n)] \quad (11)$$

$$j = 1, 2, \dots, J, i = 1, 2, \dots, I$$

Donde $\mathbf{w}_{ji}(n)$ son los coeficientes que modelan la trayectoria primaria, μ es el factor de convergencia, el cual es un valor fijo entre $[0,1]$ comúnmente elegido por el usuario mediante prueba y error, y $C[e_k(n)]$ es la función que codifica el error.

IV. ESCENARIO DE PRUEBAS

En general, el rendimiento de un sistema CAR se determina por una serie de factores, los cuales deben ser considerados durante la etapa de diseño:

1) Ubicación de los Sensores de Error, de Referencia y las Bocinas Canceladoras

La colocación óptima de la bocina canceladora es un proceso complejo. Para encontrar la ubicación óptima de esta bocina, el requisito básico es que su posición debe permitirle duplicar el campo de sonido no deseado con cierta fidelidad. Esta ubicación se puede determinar de forma teórica o experimental mediante prueba y error. En caso de que la bocina no este colocada en la ubicación óptima, esta demandará una mayor potencia para lograr la reducción de ruido esperado. Además, es importante considerar que la ubicación de los componentes del sistema CAR está en función de las frecuencias de operación, es decir, cada frecuencia de interés caracterizará un conjunto de diferentes ubicaciones óptimas de la bocina canceladora. Una vez que se ha logrado optimizar la posición de las bocinas canceladoras, las ubicaciones de los sensores de error y de referencia, el sistema de control activo podrá lograr el máximo rendimiento en términos de

cancelación de ruido. Además, para obtener un buen rendimiento en el sistema, la separación entre la fuente de ruido y la bocina canceladora debe ser pequeña y debe ser capaz de generar señales anti-ruido que varíen en función de las frecuencias que se desean controlar. Generalmente se obtiene un mejor rendimiento del sistema CAR si los sensores de error no se colocan simétricamente alrededor de las bocinas canceladoras.

2) Dispositivo de Control

La eficiencia de un controlador está determinada por la frecuencia de muestreo de los convertidores A/D, utilizados en la interfaz analógica/digital. La frecuencia de muestreo también afecta a otros parámetros del controlador, como la longitud del filtro adaptativo y la velocidad de convergencia, es decir, si la frecuencia de muestreo es demasiado rápida, la longitud de filtro requerida para lograr un resultado particular será excesiva. Además, una frecuencia de muestreo alta provoca que los pesos de filtro digital sean de gran magnitud (tanto positivos como negativos), lo que genera una inestabilidad numérica y por lo tanto una velocidad de convergencia baja. La única forma de reducir las magnitudes de los pesos, mientras se mantiene constante la frecuencia de muestreo, es aumentar la longitud del filtro. Sin embargo, esto tiene el efecto indeseable de aumentar la carga computacional. La frecuencia de muestreo óptima generalmente aceptada en los sistemas CAR es aproximadamente 10 veces la frecuencia del ruido a controlar. Por otra parte, la precisión de salida del controlador esta en función de la precisión de los convertidores A/D y D/A y la precisión del microprocesador u otros dispositivos. Hoy en día, los dispositivos embebidos (GPU, DSP, FPGA y sistemas multinúcleo) permiten la implementación de los filtros adaptativos. Para lograr una implementación eficiente se debe analizar la arquitectura de estos dispositivos, teniendo en cuenta sus sistemas de memoria, comunicación y procesamiento. Además, es importante analizar el conjunto de instrucciones para realizar el cómputo de los filtros adaptativos empleando el menor número de ciclos de reloj posibles.

En este trabajo se consideraron los aspectos anteriormente señalados para la realización de un sistema CAR aplicado a la cancelación de ruido en una ventana. El diseño del prototipo se presenta a continuación:

1) Ubicación de los Sensores de Error, de Referencia y las Bocinas Canceladoras en el Prototipo Propuesto

Para validar el funcionamiento de la ventana activa se utilizó un prototipo de recinto fabricado con madera, donde el interior simula una habitación y el ambiente exterior incide a través de una ventana. Las dimensiones del prototipo de recinto y de la ventana son 0.4 m x 0.4 m x 0.4 m y 0.15 m x 0.15 m, respectivamente. La configuración utilizada para la implementación del sistema CAR es 1:2:2; es decir, un micrófono de referencia, dos

micrófonos de error y dos bocinas canceladoras, como se muestra en la Fig. 2. El micrófono de referencia y la fuente de ruido fueron posicionados enfrente de la ventana a una distancia de 24 cm y 44 cm, respectivamente. Los micrófonos de error se colocaron en los laterales del marco de la ventana con una separación de 3 cm. Las bocinas canceladoras se ubicaron afuera del recinto a una distancia de 10.5 cm. Cabe señalar que la ubicación de los componentes del sistema CAR se determinó por prueba y error para obtener la máxima reducción de ruido a diferentes frecuencias.

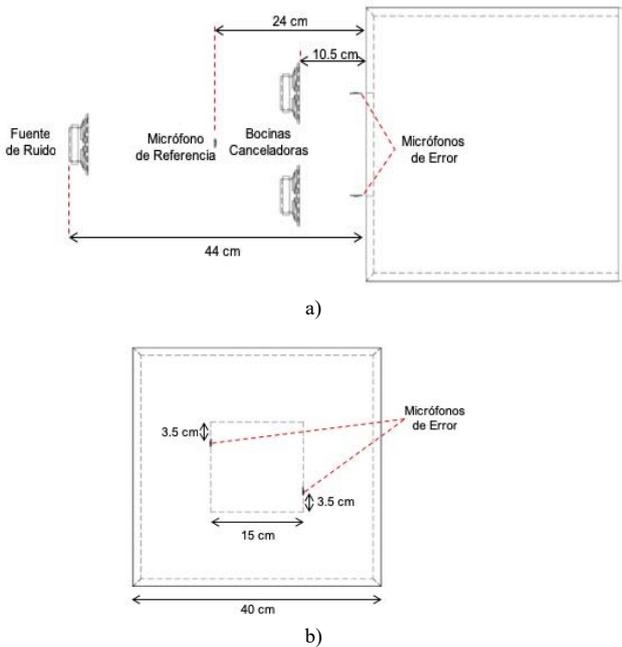


Fig. 2. Diagrama general del sistema CAR multicanal a) Vista superior y b) Vista frontal.

2) *Dispositivo de control (DSK TMS320C6713)*

Además del prototipo, se utilizó la tarjeta DSK TMS320C6713 de *Spectrum Digital* para implementar el algoritmo de control adaptativo, como se muestra en la Fig. 3. Adicionalmente, se utilizó la tarjeta de expansión de canales DSK_AUDIO4 de *Educational DSP*, dado que en esta aplicación se requiere de la implementación de un sistema multicanal. Para acondicionar las señales obtenidas de los micrófonos de error se utilizaron filtros pasa-bajas con frecuencia de corte de 1 KHz, esto con el objetivo de eliminar componentes de alta frecuencia que provocaran inestabilidad en el sistema. Debido a que la señal anti-ruido, la cual es generada por el DSP, no es de alta potencia se empleó el amplificador TPA3110 Clase-D. Por otra parte, para minimizar las señales no deseadas provocadas por efectos de reverberación el interior de la caja se cubrió con espuma acústica.

Para lograr la máxima eficiencia del procesador DSP se utilizaron las siguientes técnicas de programación:

1) *Técnica de Pipeline*

La arquitectura del DSP TMS320C6713 soporta el modo de procesamiento *pipeline* siempre y cuando el código de

programación sea escrito en lenguaje ensamblador. Además, la programación del código en ensamblador permite la ejecución de las instrucciones de manera más directa, por lo que incrementa la velocidad de procesamiento del DSP, dado que utiliza menos ciclos de reloj en comparación con un lenguaje de alto nivel como C.

2) *Programación en Paralelo*

El DSP TMS320C6713 contiene 6 ALUs y 2 multiplicadores para realizar el cómputo del algoritmo propuesto en paralelo. Un factor vital que determina el rendimiento del DSP está relacionado con el número de accesos a memoria. El DSP cuenta con la instrucción LDDW para acceder a memoria y transferir dos palabras de 32 bits en uno de sus registros empleando 4 ciclos de reloj. En caso de utilizar C, se requieren 8 ciclos de reloj para acceder a memoria. Para programar eficientemente el algoritmo propuesto se utilizaron las 6 ALUs de manera concurrente para lograr el máximo rendimiento y los multiplicadores se utilizaron de manera serial.

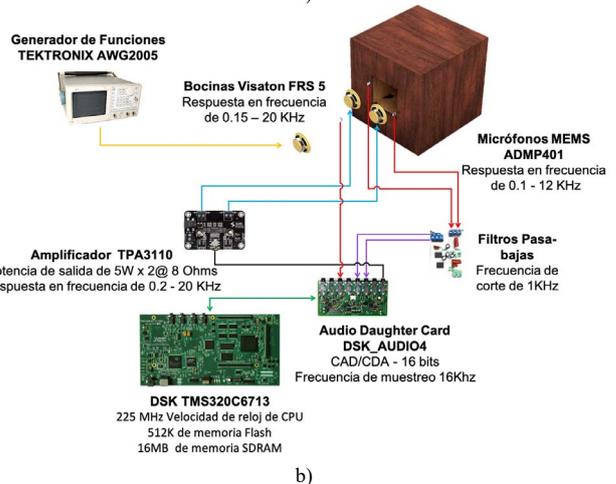
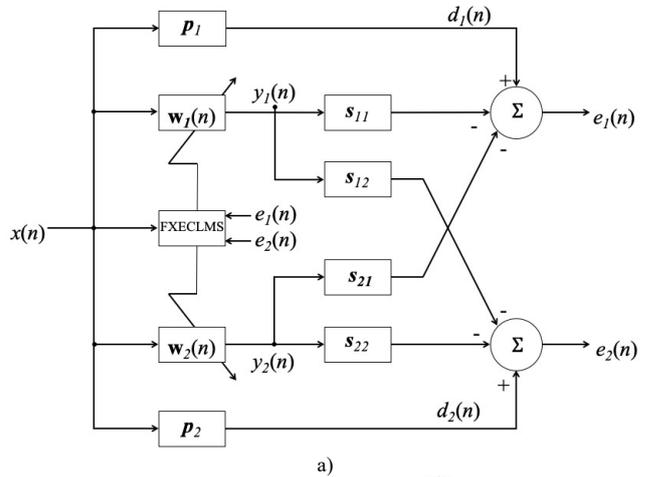


Fig. 3. Configuración experimental del sistema de ventana activa: a) diagrama a bloques del sistema. b) componentes físicos del sistema.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para llevar a cabo la configuración inicial del sistema, se requirió de la identificación offline de las trayectorias

secundarias mediante un algoritmo LMS con 64 coeficientes. Esta cantidad se eligió después de realizar diversos experimentos y encontrar el mejor funcionamiento. En la Fig. 4 se muestran las respuestas al impulso de las trayectorias s_{11} , s_{12} , s_{22} y s_{21} , las cuales son indispensables para realizar el proceso de filtrado-x. Una vez obtenidas estas respuestas, los filtros adaptativos empiezan a procesar las señales de entrada, las cuales son generadas por los micrófonos de error y referencia. El filtro adaptativo contó con 64 coeficientes, el error se codificó a 8 bits y el tamaño del paso μ fue 25×10^{-14} para todos los experimentos, cabe mencionar que este valor se obtuvo a prueba y error, eligiéndose el valor que entregó el mejor rendimiento del sistema. Para comprobar el funcionamiento del sistema CAR se realizaron diversas pruebas introduciendo un tono sinusoidal con diferentes frecuencias (400 Hz – 1,000 Hz), cabe mencionar que la frecuencia de muestreo utilizada para las pruebas fue de 16 KHz. En este experimento, cada tono fue considerado como una señal de ruido. Para verificar la eficiencia en términos de cancelación de ruido, se colocó un micrófono en el centro de la ventana y uno en el interior del prototipo, para detectar el nivel de reducción de ruido. La Fig. 5 muestra el espectro de potencia de la respuesta del sistema CAR utilizando el micrófono del centro de la ventana, empleando tres tonos representativos (440 Hz, 650 Hz y 890 Hz) como señales de ruido. Asimismo, la Fig. 6 muestra los espectros de potencia de las señales obtenidas mediante el sensor, el cual está colocado en el interior del prototipo.

Como se puede observar en la Fig. 5, el espectro de potencia de la señal de ruido, la cual es obtenida en el centro de la ventana, se redujo en casi 25 dB con respecto a la señal de referencia empleando un tono de 440 Hz. En el caso de utilizar tonos de 650 Hz y 890 Hz, el algoritmo fue capaz de reducir aproximadamente 10 dB y 17 dB, respectivamente.

Por otra parte, la Fig. 6 muestra el espectro de potencia de las señales obtenidas en el interior del prototipo. El sistema CAR reduce 12 dB, 24 dB y 10 dB la señal de ruido utilizando tonos de 440 Hz, 650 Hz y 890 Hz. La Tabla I muestra el nivel de reducción de ruido obtenido con los algoritmos FXLMS y FXECLMS.

La Tabla II presenta el número de ocasiones en las que los coeficientes del algoritmo FXECLMS se actualizaron. Como se puede observar, este algoritmo no realiza el cómputo de los coeficientes del filtro adaptativo durante todo el proceso de cancelación, lo cual permite que la carga computacional se reduzca considerablemente cuando se cumple la condición establecida en la ecuación (6).

TABLA I
NIVEL DE REDUCCIÓN DE RUIDO ALCANZADO CON EL SISTEMA CAR

Frecuencia	FXLMS		FXECLMS	
	Centro ventana	Interior prototipo	Centro ventana	Interior prototipo
440 Hz	22 dB	16 dB	25 dB	12 dB
650 Hz	10 dB	24 dB	10 dB	24 dB
890 Hz	18 dB	9 dB	17 dB	10 dB

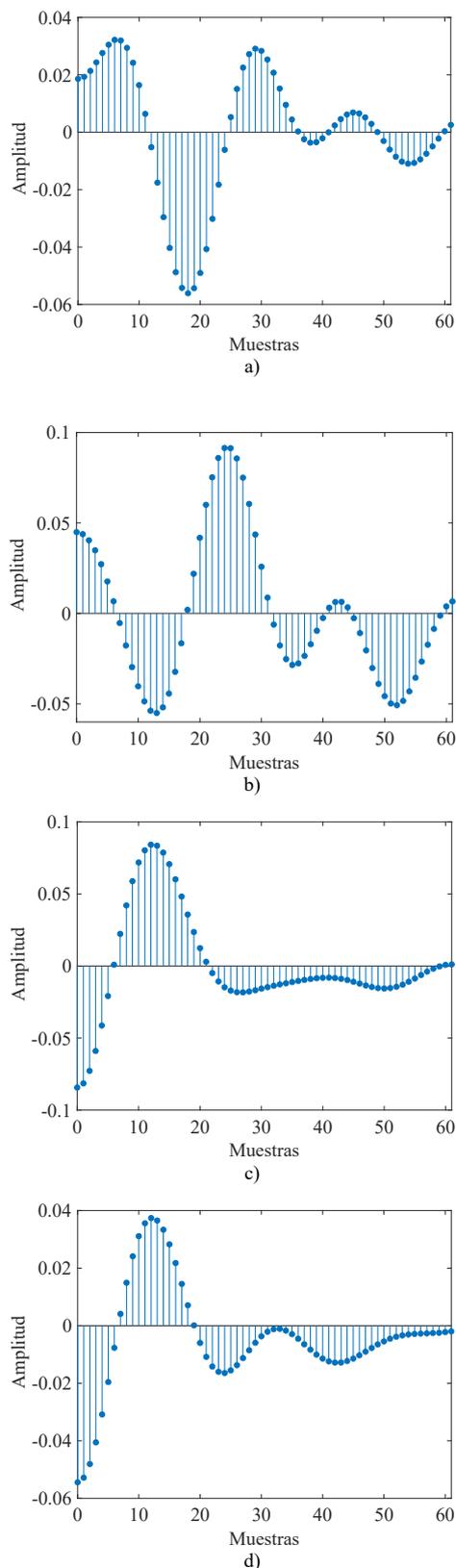


Fig. 4. Respuestas al impulso de las trayectorias: a) s_{11} , b) s_{21} , c) s_{12} y d) s_{22} .

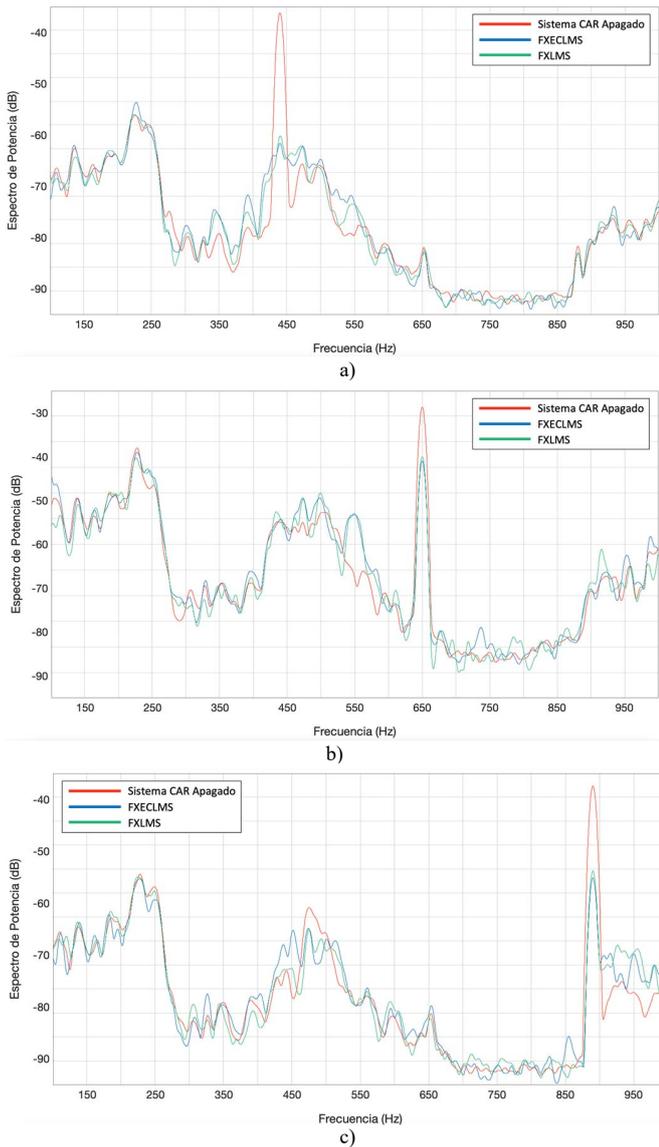


Fig. 5. Reducción de ruido en el centro de la ventana usando una señal de ruido con frecuencia: a) 440 Hz, b) 650 Hz y c) 890 Hz.

TABLA II
NÚMERO DE ACTUALIZACIONES DEL ALGORITMO FXECLMS

Frecuencia (Hz)	Total iteraciones	Actualización de coeficientes
440	238912	173440 (72.59%)
650	816705	621384 (76.08%)
890	227218	98799 (43.48%)

VI. DISCUSIÓN

Actualmente, la cancelación activa de ruido en ventanas se ha convertido en un tema de frontera dado que tiene una repercusión benéfica en la salud de las personas. Varios autores han usado algoritmos de control basados en el algoritmo FXLMS, dado que este algoritmo presenta una complejidad computacional baja, lo que beneficia el desarrollo e implementación de sistemas CAR en aplicaciones prácticas. Sin embargo, el número de operaciones se incrementa en función del número de fuentes (canales) a ser procesadas. En este

trabajo, se utilizó un algoritmo que reduce el número de operaciones durante el proceso de cancelación para garantizar una complejidad computacional baja.

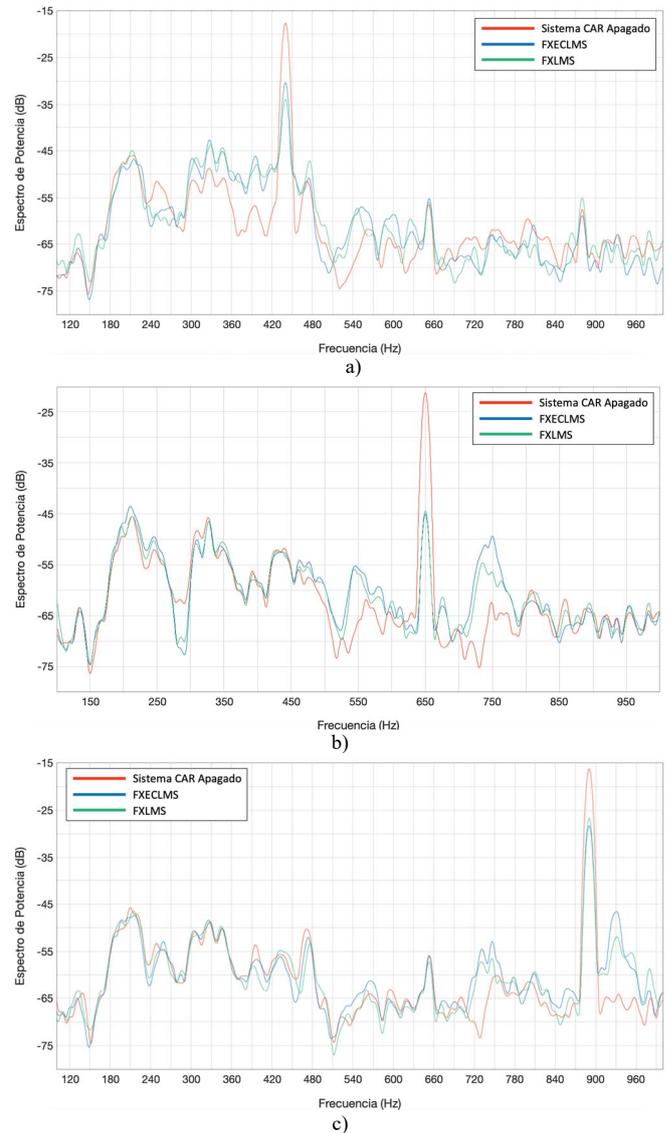


Fig. 6. Reducción de ruido en el interior del prototipo usando una señal de ruido con frecuencia: a) 440 Hz, b) 650 Hz y c) 890 Hz.

Los resultados presentados en la Tabla II muestran que el algoritmo no requiere de realizar el computo de operaciones durante todo el proceso de adaptación, realizando en algunos casos aproximadamente 24% menos operaciones y en el mejor caso obteniéndose hasta una reducción de operaciones de aproximadamente 46%. Además, los resultados obtenidos demuestran que el procedimiento utilizado asegura un nivel de cancelación similar al de otros trabajos, como se muestra en la Tabla III, en los cuales algunos requieren del uso de un mayor número de fuentes de control y filtros digitales con una cantidad mayor de coeficientes, lo que implica un costo computacional más elevado. Cabe destacar que los trabajos que existen actualmente cancelan señales de ruido en un rango de 300Hz a 2KHz, por lo que para la cancelación de señales de mayor

frecuencia se requiere del desarrollo de algoritmos y su eficiente implementación en dispositivos de hardware. De aquí la importancia del desarrollo de nuevas técnicas que permitan reducir el cómputo de operaciones, el cual es el principal problema en el desarrollo de sistemas CAR multicanal.

TABLA III
TRABAJO PREVIO DE SISTEMAS CAR PARA VENTANAS

Autor	Tamaño de la ventana (m)	Fuentes de control	Tipo de ruido	Reducción
Dupont [3]	No específica	3	Tono 0.05 – 0.6 KHz	5 dB
Hu [4]	0.2 x 0.2	1	Tono 0.3 – 1 KHz	10 dB
Tang [5]	1.35 x 1.8	3	Tono <2 KHz	5 dB
Pàmies [6]	1.42 x 0.56	1	Ruido de aeronave 0.16 KHz	3 dB
Wang [7]	0.43 x 0.67	6	Tono <0.5 KHz	15 dB
Carme [8]	0.75 x 0.75	5	Ruido de tráfico <0.3 KHz	16 dB
Murao [9]	0.2 x 0.2	4	BLWN 0.4 – 1.6 KHz	10 dB
Lam [10]	1 x 1	8	Tono 0.5 – 1.7 KHz	10 dB
Wang [11]	0.43 x 0.67	32	Tono <1 KHz	20 dB
Lam [12]	1 x 1	16	Tono 0.5 – 2.1 KHz	5 dB
Este trabajo	0.15 x 0.15	2	Tono 0.4 – 1 KHz	15 dB

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentó la versión multicanal del algoritmo de mínimos cuadrados promediados con error codificado con filtrado-x (FXECLMS) para sistemas de cancelación activa de ruido. La efectividad del algoritmo se evaluó en un sistema CAR aplicado a la cancelación de ruido en una ventana. Los resultados experimentales demuestran que el algoritmo propuesto reduce el nivel de ruido de igual forma que el algoritmo FXLMS convencional. Sin embargo, el algoritmo FXECLMS reduce la carga computacional significativamente, debido a que solo actualiza sus coeficientes cuando la señal de error es mayor a un umbral establecido a partir de la codificación de la señal de error. Además, se presentaron diversos aspectos prácticos para la colocación de las bocinas canceladoras y los sensores de error y referencia, lo cual es importante para garantizar la cancelación efectiva de ruido en sistemas CAR. Asimismo, se presentaron algunas técnicas de programación para realizar implementaciones eficientes en un DSP. Los resultados obtenidos muestran una reducción de ruido similar a la de otros trabajos, a pesar del menor número de bocinas canceladoras utilizadas.

El algoritmo FXECLMS multicanal demostró ser una buena alternativa para ser implementado en sistemas de control activo de ruido debido a su baja carga computacional y su alta efectividad en sistemas CAR.

A este sistema se le podría aumentar el número de bocinas canceladoras y sensores de error y referencia, con la finalidad de probar el prototipo en una ventana de mayor dimensión. Con lo que respecta a la ubicación de los micrófonos, se podría aplicar técnicas de beamforming para obtener las señales de entrada con menor ruido. Asimismo, para aumentar

la eficiencia del sistema se podría realizar la implementación en un dispositivo de compuertas lógicas programables (FPGA) para crear una arquitectura específica como se ha hecho en otros trabajos [19-20].

REFERENCIAS

- [1] S. M. Kuo y D. Morgan, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*, New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [2] C. H. Hansen, *Understanding active noise cancellation*. Spon press.2003.
- [3] J.-B. Dupont y M.-A. Galland, "Active absorption to reduce the noise transmitted out of an enclosure", *Applied Acoustics*, vol. 70, núm. 1, pp. 142–152, ene. 2009.
- [4] S. Hu, R. Rajamani, y X. Yu, "Directional cancellation of acoustic noise for home window applications", *Applied Acoustics*, vol. 74, núm. 3, pp. 467–477, mar. 2013.
- [5] S. Tang, Y. Tong, y K. Tsui, "The sound transmission loss across ventilation window under active noise cancellation", en *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 249, No. 5, pp. 2374-2380, 2014.
- [6] T. Pàmies, J. Romeu, M. Genescà, y R. Arcos, "Active control of aircraft fly-over sound transmission through an open window", *Applied Acoustics*, vol. 84, pp. 116–121, oct. 2014.
- [7] S. Wang, J. Tao, y X. Qiu, "Performance of a planar virtual sound barrier at the baffled opening of a rectangular cavity", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 138, núm. 5, pp. 2836–2847, nov. 2015.
- [8] C. Carme, O. Schevin, C. Romerowski, y J. Clavard, "Active noise control applied to open windows", en *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 253, No. 1, pp. 7460-7466, 2016.
- [9] T. Murao, C. Shi, W.-S. Gan, y M. Nishimura, "Mixed-error approach for multi-channel active noise control of open windows", *Applied Acoustics*, vol. 127, pp. 305–315, dic. 2017.
- [10] B. Lam, C. Shi, y W.-S. Gan, "Active noise control systems for open windows: current updates and future perspectives", en *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration*, pp. 1-7, 2017.
- [11] S. Wang, J. Tao, y X. Qiu, "Controlling sound radiation through an opening with secondary loudspeakers along its boundaries", *Scientific Reports*, vol. 7, núm. 1, dic. 2017.
- [12] B. Lam, C. Shi, D. Shi, y W.-S. Gan, "Active control of sound through full-sized open windows", *Building and Environment*, vol. 141, pp. 16–27, ago. 2018.
- [13] Ju-man Song, PooGyeon Park, "An optimal variable step-size affine projection algorithm for the modified filtered-x active noise control", *Signal Processing*, vol. 114, pp. 100, 2015.
- [14] Pucha Song, Haiquan Zhao, "Filtered-x generalized mixed norm (FXGMN) algorithm for active noise control", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 107, pp. 93, 2018.
- [15] M. Ferrer, A. Gonzalez, M. de Diego y G. Pinero, "Convex Combination Filtered-X Algorithms for Active Noise Control Systems," en *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 156-167, Jan. 2013.
- [16] J. G. Avalos Ochoa, G. Sanchez Rivera, A. Rodriguez Silva, J. Mendoza Guevara y G. Avalos Arzate, "Multichannel Filtered-X Set-Membership Affine Projection-Like Algorithm," en *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 8, pp. 2131-2137, Aug. 2018.
- [17] J. Velázquez, J. C. Sánchez, and G. Ávalos, "Algoritmo de Mínimos Cuadrados con Error Codificado para Filtrado Adaptivo," *Información tecnológica*, vol. 19, pp. 85–96, 2008.
- [18] E. Pichardo, X. Maya, A. A. Vázquez, J. G. Avalos y J. C. Sánchez, "Implementación de un cancelador activo de ruido en un ducto usando el algoritmo FXECLMS", *Research in Computing Science*, vol. 137, pp. 51 -61.
- [19] C. Diaz, G. Sanchez, J.-G. Avalos, G. Sanchez, J.-C. Sanchez, y H. Perez, "Spike-based compact digital neuromorphic architecture for efficient implementation of high order FIR filters", *Neurocomputing*, vol. 251, pp. 90–98, ago. 2017.
- [20] G. Sanchez et al., "A highly scalable parallel spike-based digital neuromorphic architecture for high-order fir filters using LMS adaptive algorithm," *Neurocomputing*, vol. 330, pp. 425–436, Feb. 2019.



Ángel A. Vázquez received the BS degree at Instituto Politécnico Nacional, Mexico, in 2017. Currently, he is a Master student at the Instituto Politécnico Nacional, Mexico. His research interest are signal processing, adaptive systems and digital filtering.



Xochitl Maya received the BS degree at Instituto Politécnico Nacional, Mexico, in 2017. Currently, she is a Master student at the Instituto Politécnico Nacional, Mexico. Her research is focused on audio signal processing, active noise control and digital filtering.



Alonso Fernández received the BS degree in physics, from the Faculty of Sciences of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), in 2018. His research interest are solid state physics, signal processing and noise control.



Juan Gerardo Avalos was born in Mexico in 1984. He received the M.Sc. in microelectronics from the National Polytechnic Institute, Mexico, in 2010 and the Ph.D. degree in electronics and communications engineering from the National Polytechnic Institute, Mexico, in 2014. From 2011 to 2012 he was visiting researcher at the Vienna University of

Technology, Austria. He is currently working as a Professor in the department of computer engineering, at the National Polytechnic Institute, Mexico.



Giovanni Sánchez received the M.S. degree at Instituto Politecnico Nacional, Mexico, in 2008, and the Ph.D. degree at Universitat Politecnica de Catalunya, Spain, in 2014. His research is focused on developing early auditory neural processing systems, neural-based cryptosystems in neuromorphic hardware, image and audio processing. Currently,

he is an Associate Professor in the Instituto Politecnico Nacional, Mexico.



Juan Carlos Sánchez-García Received Electronic Engineer and Doctor of Science degree from the Universidad Autonoma Metropolitana, at Mexico City, in 1987 and 2000, respectively. From 1987 to 1997 he was teacher at the same institution. Since 1997 he is a Researcher at the Graduate Studies and Research Section at ESIME Culhuacan, of Instituto

Politécnico Nacional (IPN) in Mexico. He received the Prize for Research 1999, in the Area of Telecommunications, Computing and Teleinformatics, by the IPN and he has been a Member of the National System of Researchers of Mexico (SNI). His area of interest is in signal processing and the development of analog and digital circuits for telecommunications, medicine and control.



Hector Perez-Meana received the M.S. degree from the University of Electro-Communications, Tokyo Japan, a Ph. D. degree in Electrical Engineering from Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, in 1989. In 1981 he joined the Electrical Engineering Department of the Metropolitan University, Mexico City, where he was a Professor. From March

1989 to September 1991, he was a visiting researcher at Fujitsu Laboratories Ltd, Kawasaki, Japan. In February 1997, he joined the Graduate Department of The Mechanical and Electrical Engineering School, Culhuacan Campus (ESIME-C) of the National Polytechnic Institute of Mexico, where he is now a Professor. From 2006 to 2010 he was Dean of the Graduate Department of the ESIME- C; and from 1999–2006 and 2010–2013 Chair of the PhD program on Communications and Electronics Engineering of the IPN. In 1991 he received the IEICE excellent Paper Award, and in 1999 and 2000 the IPN Research Award. In 1998 he was Co-Chair of the ISITA'98, and general Chair of The Midwest Symposium on Circuit and Systems, 209. His principal research interests are adaptive systems, image processing, pattern recognition, information security and related fields. Dr. Perez-Meana is a member of the IEEE, IEICE, the National Researchers System of Mexico and the Mexican Academy of Science.