



**ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

PROYECTO DE GRADO



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO
GENERADO POR PERTURBACIONES SEUDO PERIÓDICAS EN RECINTOS
CERRADOS**

Autores:

Never Lenin Mora Vergara

Carlos Alberto Sierra Ordóñez

Presentado a:

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRICA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA, ENERO DE 2009**



**ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

PROYECTO DE GRADO



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO
GENERADO POR PERTURBACIONES SEUDO PERIÓDICAS EN RECINTOS
CERRADOS**

Autores:

Never Lenin Mora Vergara

Carlos Alberto Sierra Ordóñez

Presentado a:

Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Director de Proyecto

Profesor CESAR ANTONIO DUARTE GUALDRÓN

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Codirector del Proyecto

Profesor JORGE LUIS CHACON VELASCO

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRICA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA, ENERO DE 2009**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1. CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO (ANC POR SUS SIGLAS EN INGLES ACTIVE NOISE CONTROL).....	3
1.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO.....	4
2. SISTEMAS DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDOS REALIMENTADOS.....	8
2.1. MODELO GENERAL DE UN SISTEMA ANC FEEDBACK.....	9
3. ASPECTOS IMPORTANTES DE EL PROBLEMA FÍSICO PARA LOS SISTEMAS CANCELADORES DE RUIDO.....	12
3.1 ELECCIÓN DE LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA.....	13
4. SIMULACIONES EN MATLAB DE ALGORITMOS LMS Y NLMS.....	16
5. IMPLEMENTACIÓN DEL CANCELADOR ACTIVO DEL RUIDO.....	19
5.1. IMPLEMENTAR EL CANCELADOR ACTIVO DE RUIDO FXLMSFEEDBACK.....	19
5.2 PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CAMINO ACÚSTICO SECUNDARIO.....	22

5.3.	DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS EN EL DSP C6711.....	24
5.4	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE NECESARIOS PARA REALIZAR EL EXPERIMENTO.....	26
5.5	OBSERVACIONES ACERCA LAS POSICIONES DEL SENSOR Y EL ACTUADOR.....	29
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS CUANTITATIVOS OBTENIDOS.....	31
7	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	42
	CONCLUSIONES.....	46
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	ANEXOS.....	53

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA DE TIPOS DE SISTEMAS ANC.....	5
FIGURA 2: ESQUEMA DEL SISTEMA ANC FEEDFORWARD BANDA ANCHA.....	5
FIGURA 3: ESQUEMA DEL SISTEMA ANC FEEDFORWARD BANDA ANGOSTA GENERALMENTE EMPLEADO.....	6
FIGURA 4: ESQUEMA DEL SISTEMA ANC FEEDBACK BANDA ANCHA Y BANDA ANGOSTA.....	7
FIGURA 5: ESQUEMA DEL SISTEMA ANC FEEDBACK GENERAL.....	9
FIGURA 6: ESQUEMA DEL SISTEMA ANC FEEDBACK FXLMS.....	11
FIGURA 7: A) SISTEMA DE CANCELACIÓN DE SEÑALES DE SONIDO PARA DOS FUENTES PUNTUALES E INVERTIDAS, B).....	12
FIGURA 8: RESPUESTA DE LA SIMULACIÓN PARA EL ALGORITMO LMS.....	16
FIGURA 9: CURVA DE ERROR PARA EL ALGORITMO LMS.....	17
FIGURA 10: RESPUESTA DE LA SIMULACIÓN PARA EL ALGORITMO NLMS.....	17
FIGURA 11: CURVA DE ERROR PARA EL ALGORITMO LMS.....	18
FIGURA 12: ESQUEMA DEL ALGORITMO FXLMS FEEDBACK.....	19
FIGURA 13: ESQUEMA DEL ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DEL CAMINO ACÚSTICO SECUNDARIO.....	22
FIGURA 14: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO.....	25
FIGURA 15: FOTOGRAFÍA DEL CANCELADOR ACTIVO DE RUIDO IMPLEMENTADO.....	26
FIGURA 16: DIAGRAMA DEL CANCELADOR ACTIVO DE RUIDO IMPLEMENTADO.....	27

FIGURA 17: UBICACIÓN RELATIVA PARLANTE/CANCELADOR.....	30
FIGURA 18: ESPECTRO DE SEÑAL SAWTOOTH 200HZ ANTES DE LA CANCELACIÓN.....	31
FIGURA 19: ESPECTRO DE SEÑAL SAWTOOTH 200HZ DESPUÉS DE LA CANCELACIÓN.....	32
FIGURA 20: SEÑAL SAWTOOTH 200HZ EN EL DOMINIO TEMPORAL ANTES Y DESPUÉS DE LA CANCELACIÓN.....	33
FIGURA 21: SEÑAL SAWTOOTH 200HZ → VALORES RMS Y MEDIA.....	34
FIGURA 22: SEÑAL SENOIDAL 200HZ ANTES DE LA CANCELACIÓN ACTIVA.....	34
FIGURA 23: SEÑAL SENOIDAL 200HZ DESPUÉS DE LA CANCELACIÓN ACTIVA.....	35
FIGURA 24: SEÑAL SENOIDAL 200HZ → VALORES RMS Y MEDIA.....	35
FIGURA 25: SEÑAL TRIANGULAR 200HZ ANTES DE LA CANCELACIÓN.....	36
FIGURA 26: SEÑAL TRIANGULAR 200HZ DESPUÉS DE LA CANCELACIÓN.....	36
FIGURA 27: SEÑAL SENOIDAL 390HZ ANTES DE LA CANCELACIÓN.....	37
FIGURA 28: SEÑAL SENOIDAL 390HZ DESPUÉS DE LA CANCELACIÓN.....	37
FIGURA 29: DECIBELES DE ATENUACIÓN DE LA SEÑAL RESULTANTE VS FRECUENCIA EN HERTZ.....	38
FIGURA 30: REDUCCIÓN DEL VALOR RMS DE LA SEÑAL RESULTANTE VS FRECUENCIA EN HERTZ.....	39
FIGURA 31: RESPUESTA MODAL DE UNA ONDA SONORA EN UN ESPACIO CERRADO.....	40
FIGURA 32: SENOIDAL ANTES DE LA CANCELACIÓN ACTIVA.....	44
FIGURA 33: SENOIDAL DESPUÉS DE LA CANCELACIÓN ACTIVA.....	44

RESUMEN

TITULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO GENERADO POR PERTURBACIONES SEUDO PERIODICAS EN RECINTOS CERRADOS¹

AUTORES: MORA VERGARA NEVER LENIN Y SIERRA ORDÓÑEZ CARLOS ALBERTO²

PALABRAS CLAVES: CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO, ALGORITMOS ADAPTATIVOS, IMPLEMENTACIÓN DSP

DESCRIPCIÓN:

El control activo de ruido busca cancelar componentes espectrales del ruido en el dominio acústico mediante interferencia destructiva de ondas sonoras. El rango de frecuencias para el cual es efectiva esta técnica es de 0 Hz a 500 Hz, debido a la naturaleza de las ondas en dicho rango (Longitud de Onda y Frecuencia) y también a la gran cantidad de material necesario por técnicas pasivas de cancelación de ruido para atenuar componentes en la banda de frecuencias mencionada.

Los resultados obtenidos mediante simulaciones indican que cualquier algoritmo adaptativo dentro del dominio eléctrico muestran resultados muy satisfactorios y la curva de convergencia se estabiliza para menos de 500 muestras de iteración. Las mismas pruebas se realizaron en el dominio acústico en tiempo real y no se lograron las mismas curvas de adaptación ni convergencia, Esto limitó las posibilidades de selección del algoritmo para realizar la implementación en tiempo real.

El algoritmo adaptativo seleccionado fue el FXLMS Retroalimentado. Se implementó para ello un filtro LMS de 128 coeficientes para generar la señal de antisonido (la misma de ruido pero invertida en fase) además de un filtro FIR de orden 128 que modela el camino acústico secundario. Para pruebas con menos coeficientes los resultados no fueron positivos y se pudo concluir que es necesario aumentar el orden del filtro LMS para obtener resultados cada vez más efectivos en materia de atenuación de intensidad sonora y para permitir un funcionamiento de banda ancha (atenuar mas componentes espectrales al mismo tiempo), aunque los algoritmos retroalimentados funcionen mejor para banda angosta

Se utilizó para la implementación en tiempo real del sistema una tarjeta de desarrollo Texas TMS320C6711, un parlante como actuador y un micrófono como sensor. El algoritmo seleccionado permitió observar resultados de hasta 40 decibeles de atenuación para la zona cercana al sensor.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Cesar Antonio Duarte Gualdrón. Codirector: Jorge Luis Chacón.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF AN ACTIVE NOISE CONTROL SYSTEM GENERATED BY PSEUDOPERIODIC PERTURBATIONS IN ENCLOSED SPACES³

AUTORS: Sierra Ordóñez Carlos Alberto and Mora Vergara Never Lenin⁴

KEYWORDS: Active Noise Control, Adaptive Algorithms, DSP Implementation

DESCRIPTION:

The active noise control looks for cancel spectral components of noise in the acoustic domain using destructive interference of sound waves. The effective range of frequencies for this technique is from 0 Hz to 500 Hz, because the nature of the waves in that range (Wavelength and Frequency) and equally due to the great quantities of absorbing materials needed by passive techniques to absorb spectral components in then mentioned band.

The obtained results by simulations indicate than all adaptive algorithms in the electric domain shows satisfactory results and the convergence curve stabilizes for less than the first 500 samples. The same tests have been done in the acoustic domain in real time and the adaptation curves didn't show the same behavior. That fact limits the algorithm selection for the real time implementation.

The selected algorithm was the FXLMS Feedback. It was implemented LMS filter with 128 taps to generate the antinoise signal (the same noise signal but inverted in phase) also a 128 FIR filter that models the acoustic secondary path. For test with fewer coefficients, the results weren't so good and it could conclude that the better results will be obtained with increasing LMS filter order. Better results means higher attenuation of acoustic intensity and allow broadband operation (Attenuate more spectral components at the same time) although the feedback algorithms work better for narrowband

The TMS320C6711 platform was used for the real time implementation, a loudspeaker was the actuator and a microphone was the sensor. The selected algorithm allowed observing 40dB of acoustic attenuation in the zone near the sensor.

³ Proyecto de Grado

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: Cesar Antonio Duarte Gualdrón. Codirector: Jorge Luis Chacón.

INTRODUCCIÓN

Desde hace más de medio siglo han surgido intentos por abordar un problema que aunque es muy cotidiano en nuestra vida actual, es también un poco complejo de tratar, este es el de la “Cancelación Activa de ruido”. El numero de estos intentos ha crecido mucho en las últimas dos décadas impulsados por motivos diferentes pero igualmente poderosos, uno es lo llamativo o curioso que resulta ser el problema como tal y el otro es el significativo avance de la tecnología en el desarrollo de nuevos elementos de procesamiento de señales más capaces y que brindan la oportunidad de realizar experiencias que antes se veían afectadas por este aspecto.

Esta inquietud que al principio parecía muy por fuera de lo común fue la introducción a este proyecto de grado, al final nos encontramos rodeados de mucha gente en esta búsqueda, ya que eran muchas personas a nivel mundial que habían puesto sus ojos antes y lo siguen haciendo en este problema (hay toda una comunidad de investigadores y empresas involucradas), y aunque nuestro trabajo solo comprende algo básico en este tema si puede ser capaz de abrir las puertas o de informar un poco más a los futuros interesados en esta área de las ciencias, con resultados suficientemente observables que pueden servir como un punto de comparación en futuros proyectos o iniciativas tanto a nivel local, regional y nacional.

OBJETIVO GENERAL

Realizar el montaje de un sistema electrónico compuesto por actuadores, sensores y un sistema procesador de señales, basado en la técnica de filtrado adaptativo para generar interferencia destructiva en un recinto cerrado, con el cual lograr una reducción de los niveles de ruido en la zona cercana a los sensores.

Objetivos Específicos

Investigación y selección de una técnica de filtrado adaptativo óptima para la solución del problema

- Determinar cuál de las tecnologías utilizadas para este tipo de sistemas es la más óptima, con base en la información recopilada y en los costos del montaje.
 - o DSP
 - o FPGA
 - o PC
 - o Sistema híbrido PC – (DSP ó FPGA)
- Diseño de una planta prototipo que permita:
 - o Un mayor control de las pruebas
 - o Determinación de parámetros físicos del sistema cancelador
 - o Verificación de resultados

1. CANCELACION ACTIVA DE RUIDO **(ANC por sus siglas en ingles *Active Noise Control*)**

La cancelación activa de ruido es un campo nuevo en la práctica del control relativamente hablando, debido en gran medida a que la tecnología necesaria para llevar a cabo cualquier experiencia en este campo y que a su vez arrojará un resultado significativo solo ha estado disponible en las recientes décadas; esto ha influido para que la misma no se haya podido masificar en términos de investigación y experimentación.

Básicamente esta busca, basada en componentes electrónicos (dispositivos para el procesamiento de las señales) y ayudada de elementos de reproducción de ondas sonoras como de sensores para las mismas (parlantes y micrófonos), tener el conocimiento suficiente sobre la señal de ruido y generar una anti señal cuyo objetivo como tal es cancelar la original (señal de ruido). Tal objetivo es casi imposible de alcanzar aun con la tecnología disponible, debido en gran parte a que si no se cumplen características especiales del problema en si, como ancho de banda de la señal a cancelar o características del espacio físico donde esta se da, el método de cancelación activa adecuado para solucionarlo cambia...o incluso puede llegar a ser mejor abordarlo con métodos pasivos por el control del ruido acústico.

En las dos últimas décadas se han desarrollando muchas teorías, algoritmos y componentes tecnológicos de forma paralela, con el fin de obtener cada vez mejores resultados en materia de atenuación acústica en lugares donde se requiera protección del sistema auditivo de personal expuesto a altos niveles de contaminación de este tipo.

1.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO

La cancelación activa de ruido se puede dividir fundamentalmente en dos tipos de problema, uno de banda ancha y otro de banda angosta.

- Sistemas para cancelación activa de ruido de banda ancha
- Sistemas para cancelación activa de ruido de banda angosta

En el caso de los sistemas de cancelación de ruido de banda ancha, estos necesitan conocer la señal de ruido a cancelar, donde la medición de esta se utiliza como una señal de referencia para el sistema cancelador.

Por otro lado en la cancelación activa de ruido de banda angosta estos pueden basarse en el hecho de que el ruido producido por esta maquinaria esta dado por armónicos que se dan producidos por la frecuencia de rotación fundamental de la misma, y teniendo esta información a priori como base se elimina el problema de causalidad del sistema, en estos casos es común el uso de tacómetros para establecer dicha frecuencia y generar el anti sonido en esta y sus respectivos armónicos.

Teniendo conocimiento de esos dos tipos de problema, los sistemas de cancelación activa de ruido luego se basan en dos métodos, feedforward y feedback control. Los sistemas de cancelación feedforward son aquellos donde la señal de ruido es censada antes de que esta pase por los parlantes canceladores y es tomada como referencia para el sistema de control. Los sistemas Feedback (retroalimentados) son los realizados sin tener en cuenta esta señal y solo se mide una señal de error que luego es retroalimentada al cancelador.

Estas situaciones y los diferentes tipos de sistemas ANC y sus implementaciones básicas se muestran mejor en las siguientes figuras:

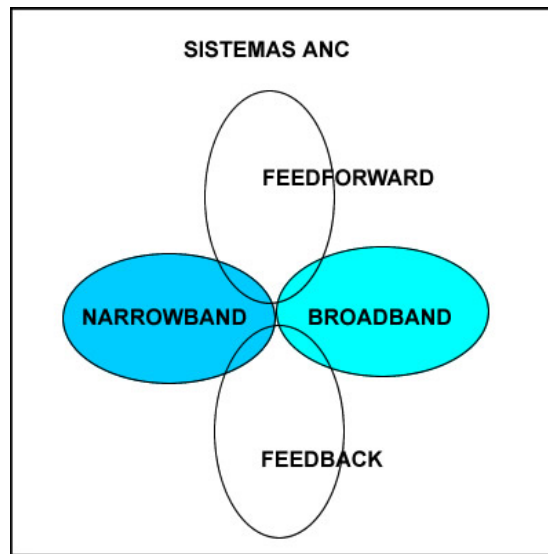


FIGURA 1: Esquema de tipos de Sistemas ANC

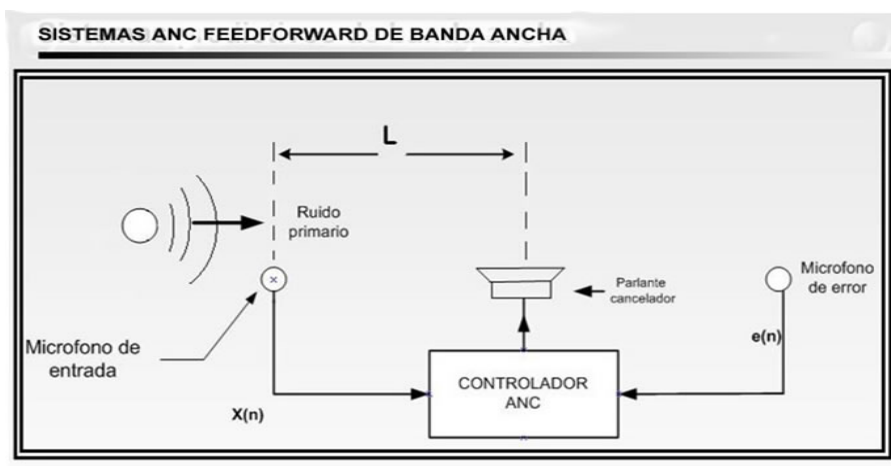


FIGURA 2: Esquema del Sistema ANC Feedforward banda ancha

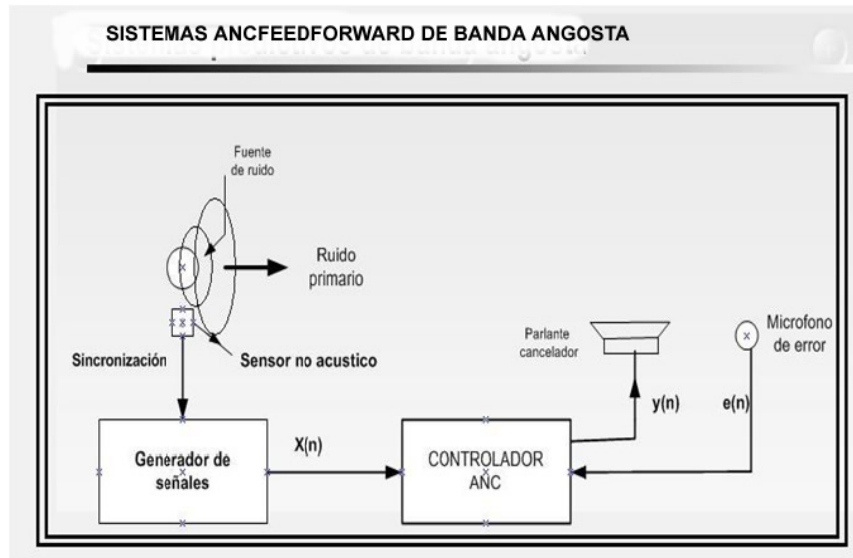


FIGURA 3: Esquema del Sistema ANC Feedforward banda angosta generalmente empleado

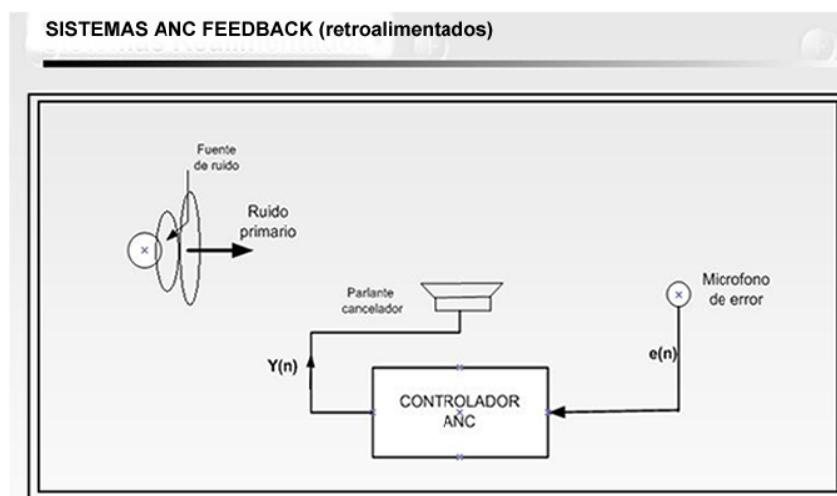


FIGURA 4: Esquema del Sistema ANC Feedback banda ancha y banda angosta

Como se puede observar en estas graficas la implementación más común de los sistemas feedback es la misma para broadband como para narrowband.

Otro tipo de sistemas ANC son los sistemas multicanal los cuales usan varios sensores para medir la señal en diferentes partes del espacio donde cada sector espacial puede tomarse como un canal para el que el controlador debe una señal de anti ruido.

En este proyecto se implementaron algoritmos para la cancelación activa de ruido retroalimentados por dos aspectos básicamente:

- Este tipo de cancelación activa de ruido solo necesita un micrófono para medir la señal de error, esta parte se acomoda un poco a los recursos con los cuales cuenta la escuela en materia de DSP's (como se explicara más adelante esta fue la plataforma de desarrollo seleccionada) ya que solo poseen una sola entrada análoga de audio.
- Otra de las características favorables de este tipo de algoritmos es que poseen un consumo de computacional relativamente más bajo que los sistemas feedforward y en lo cual también teníamos limitaciones en los DSP's disponibles.

2. SISTEMAS DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDOS REALIMENTADOS

Los sistemas de cancelación activa de ruido retroalimentados pueden ser tan sencillos como un amplificador diseñado de tal manera que amplifique la señal de ruido tomada por un micrófono sensor para que esta cancele la señal de ruido como tal, siendo este uno de los más básicos pero que presenta muchos problemas debido a que la efectividad del mismo depende en gran medida de la exactitud con que se diseñe el amplificador, también estará restringido a un ancho de banda reducido y presentara problemas inestabilidad debido a la retroalimentación del sistema como tal.

Un ejemplo de sistema de cancelación activa de ruido retroalimentado es el implementado se basa en este mismo principio pero a diferencia de tener solo un amplificador con características especiales para realizar la cancelación, este es reemplazado por un controlador activo que es capaz de modificar los coeficientes de un filtro dependiendo de la señal de error para así generar la señal canceladora, cuyo esquema general se pudo observar en la figura 4.

Por otro lado el controlador activo en la mayoría de los casos está basado filtros adaptativos los cuales pueden modificar sus coeficientes dependiendo de las señales de entrada, en este caso de la señal de error.

Estos filtros adaptativos pueden ser realizados en base a las siguientes técnicas:

- Filtros con respuesta al impulso finita FIR
- Filtros con respuesta al impulso infinita FIR (recursivos)
- Filtros tipo lattice
- Filtros en el dominio de la transformada

Siendo el más común de los algoritmos aplicados a los filtros adaptativos [1] el algoritmo lms, en gran parte debido a su bajo costo computacional y simplicidad. (Ver anexo C)

2.2 MODELO GENERAL DE UN SISTEMA ANC FEEDBACK

El sistema de cancelación activa de ruido retroalimentado se puede analizar en el dominio de la frecuencia mediante el siguiente esquema.

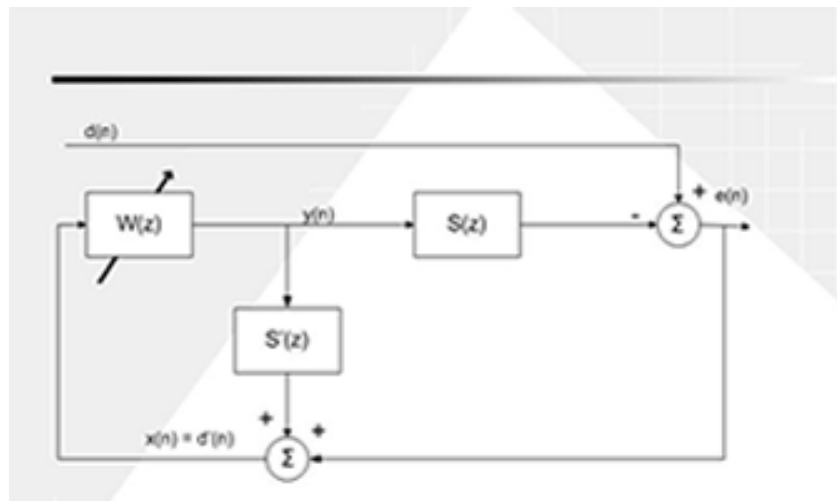


FIGURA 5: Esquema del Sistema ANC Feedback general

Es importante notar que la señal de ruido inicial $d(n)$ no se encuentra disponible en este sistema ya que es intentada ser cancelada por la señal de anti ruido generada por el cancelador, pero en términos generales la idea de este sistema es la de estimar esa fuente primaria de ruido y usarla también como una referencia para modificar los coeficientes del filtro adaptativo, $W(z)$.

Según este esquema esta fuente primaria puede ser representada en términos de la señal de error $E(z)$ censada por el micrófono de error, la función de transferencia de la

planta o sistema físico entre el punto donde el controlador genera la señal y el micrófono de medición del error $S(z)$, como también de la misma respuesta generada por el cancelador $Y(z)$, mediante la siguiente ecuación.

$$D(z) = E(z) + S(z)Y(z) \quad (2.2.1)$$

Luego se busca tener una medida aproximada de $S(z)$ es decir una $S'(z)$ tal que $S'(z)$ aproximadamente igual a $S(z)$ para poder deducir así una fuente primaria de ruido también aproximada $D'(z)$, y utilizarla como una señal de referencia sintetizada $x(n)$ (esta es la señal medida por el micrófono en los sistemas feedforward antes de pasar por el sistema cancelador), en pocas palabras se simula un sistema feedforward a partir de una aproximación a $S(z)$. Esto se puede apreciar la figura 5, donde la señal secundaria $y(n)$ (señal canceladora) es filtrada por este camino secundario estimado y sumada a $e(n)$ para así recrear o simular $x(n)$.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l)$$

Un sistema retroalimentado completo utilizado en la actualidad ilustrado de forma completa es como el que se muestra en la figura 6 y es llamado el algoritmo FXLMS para sistemas retroalimentados, donde $S'(z)$ también se utiliza para calcular el camino secundario. El sistema completo se puede escribir en la ecuación 2.2.2.

$$x(n) \equiv d'(n) = e(n) + \sum_{m=0}^{M-1} s'_m y(n-m) \quad (2.2.2)$$

Donde s'_m , $m=0,1,2,\dots,M-1$ son los coeficientes del filtro FIR $S'(z)$ de orden M , usado para estimar el camino secundario. La estimación de $S(z)$ se puede realizar online o offline, la primera consiste en calcular continuamente mediante un algoritmo adaptativo los coeficientes de $S'(z)$ que se ajusten de mejor manera a la verdadera $S(z)$, o de manera offline lo que consiste básicamente el cálculo en lazo abierto de $S(z)$, generando una señal de ruido blanco con tiempo suficiente para que estos se aproximen lo suficiente al valor real (el esquema se mostrara más adelante y también se volverá a hablar de este procedimiento).

La señal secundaria $y(n)$ es esta dada por:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n) x(n-l) \quad (2.2.3)$$

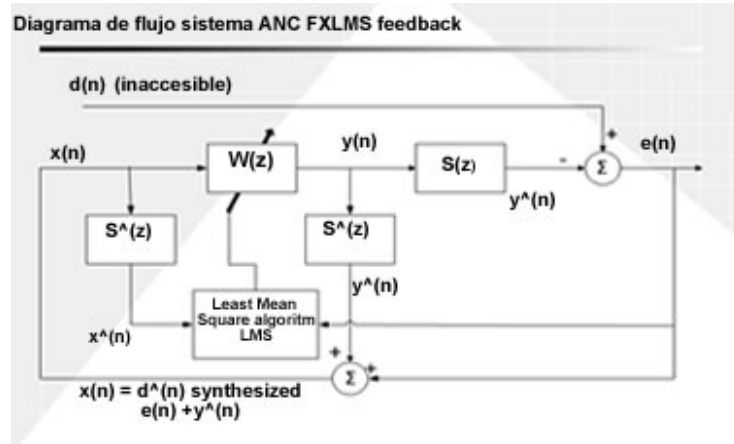


FIGURA 6: Esquema del Sistema ANC Feedback FXLMS

Nota: Las figuras 5, 6 y 30 fueron tomadas de la bibliografía 2.

Son entonces actualizados mediante el algoritmo FXLMS de la forma: Donde $w_l(n)$, $l=0,1,\dots,L-1$ son los coeficientes de $W(z)$ en el tiempo n , y L es el orden del filtro $W(z)$. y están dados por

$$w_l(n+1) = w_l(n) + \mu x'(n-1)e(n), \quad l = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2.2.4)$$

Donde μ es el tamaño del paso, y

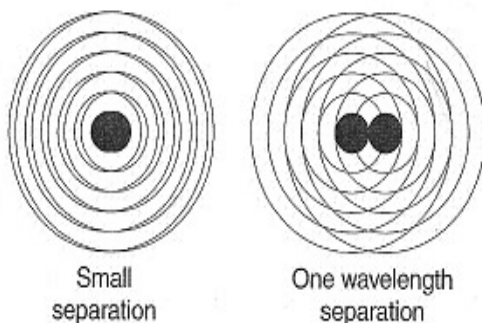
$$x'(n) \equiv \sum_{m=0}^{M-1} s'_m y(n-m) \quad (2.2.5)$$

es la señal de referencia filtrada.

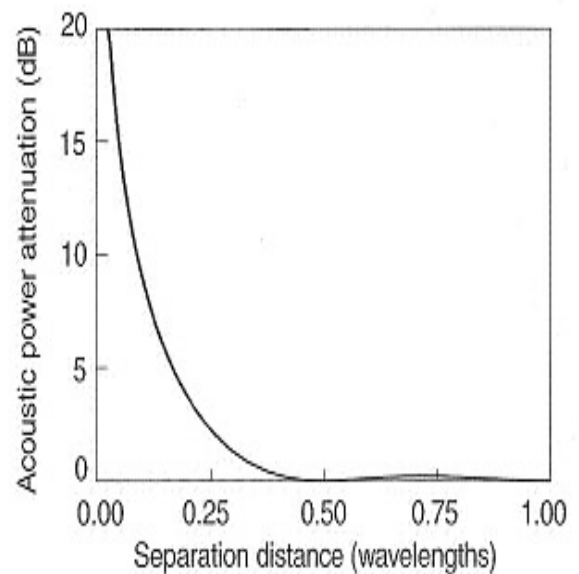
En este trabajo denominamos algoritmo feedback lms a un algoritmo FXLMS en el cual se suponen los coeficientes del filtro $S'(z)$ iguales todos a 1 y estos no se actualizan, lo que en realidad no se esté modelando el camino secundario.

3. ASPECTOS IMPORTANTES DE EL PROBLEMA FISICO PARA LOS SISTEMAS CANCELADORES DE RUIDO

La cancelación activa de ruido solamente funciona a bajas frecuencias porque la separación entre la fuente de contaminación acústica y la de anti sonido debe irse reduciendo a medida que los modos de vibración del campo acústico generado se van haciendo cada vez más pequeños. De modo que para frecuencias mayores a 500Hz la distancia a la que se debe ubicar el parlante cancelador de la fuente de ruido es tan pequeña que resulta inaplicable la implementación de un sistema ANC, esta relación se puede ver en las siguientes graficas, donde la distancia de separación está dada en fracciones de la longitud de onda $\gamma = 334[m/s]/f$, donde γ es la longitud de onda y f es la frecuencia de la señal.



(a)



(b)

FIGURA 7: a) sistema de cancelación de señales de sonido para dos fuentes puntuales e invertidas, b) atenuación en decibelios de la señal cancelada en función con la separación de las dos señales en función de la longitud de onda.

Nota: las figuras 7, 12 y 13 fueron tomadas de la bibliografía 3.

Si la distancia entre la fuente de perturbación y la de anti sonido (fuentes puntuales o cilíndricas) es pequeña, esta debe ser una fracción de la longitud de onda de la señal a cancelar.

Nota: las graficas 7a y 7b fueron tomadas de la bibliografía 3de este

3.1. ELECCIÓN DE LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA

Este proyecto, como ya sea mencionado, está orientado a reducir los niveles de intensidad acústica medida en decibeles para frecuencias entre 0Hz y 500Hz, todo debido a que en dicho rango espectral las técnicas de cancelación pasiva de ruido son ineficientes, debido a los altos costos y grandes cantidades de material necesarias para obtener los mismos resultados.

Lo primero al momento de elegir la plataforma tecnológica sobre la cual se va a realizar el proyecto, es que la respuesta temporal del hardware elegido sea lo más rápida posible, de modo que el tiempo que tarda la señal en ser digitalizada, procesada y convertida a modo analógico nuevamente sea mínimo.

Inicialmente se había propuesto el uso de un PC estándar y de la interfaz de adquisición de datos que provee una tarjeta de sonido cualquiera de especificaciones mínimas, acompañado del uso de Matlab y de su toolbox de adquisición de datos que permite interactuar directamente con este hardware. Se realizaron varias pruebas de desempeño de esta tecnología y los resultados no fueron favorables debido al tiempo que tarda la señal en ser procesada, se observó que el tiempo mínimo de toma de muestras era de un milisegundo y este tiempo es demasiado grande para obtener cancelación activa de ruido continua y estable.

Posteriormente se eligió la tecnología DSP de Texas Instruments facilitada por la universidad. Se iniciaron desarrollos software encaminados a la implementación en tiempo real del cancelador activo de ruido en el kit de desarrollo TMS320VC5402 DSK.

Se realizaron muchas pruebas y se encontraron muchos inconvenientes pues la tarjeta presentaba problemas en la configuración de su módulo de conversión digital-analógica y no mantenía un comportamiento estable cuando se trataba de digitalizar señales y de convertirlas a señales análogas nuevamente. El comportamiento de este kit de desarrollo es bastante bueno pero solamente cuando el CODEC (Codifier-Decodifier) era utilizado en modo unidireccional, es decir cuando no se intenta utilizar para desarrollos REALTIME (cuando el tiempo que tarda la señal en ser adquirida – procesada y generada debe ser mínimo). Tales resultados obligaron a buscar una nueva plataforma estable y más rápida en materia de procesamiento, cuyo CODEC permitiese la operación bidireccional y cuya frecuencia de muestreo sea suficiente para permitirle al algoritmo del cancelador la cantidad de muestras necesarias para obtener estabilidad y convergencia.

Finalmente se tuvo acceso al kit de desarrollo de Texas TMS320VC6711, el cual es la base tecnológica que sirvió para realizar la implementación en tiempo real del proyecto actual, debido a la facilidad de programación mediante ANSI C++ y a la aplicabilidad de la tecnología DSP-BIOS disponible también para el kit TMS320VC5402 es en este caso mucho mas aprovechable. El uso de la DSP-BIOS en el caso del kit 5402 estaba muy relacionado con el manejo de subrutinas previamente programadas en Turbo ASM mientras que en el caso del kit 6711 basta con configurar el archivo CDB que permite relacionar código en ANSI C++ con el manejo de subrutinas y modos de asignación de memoria, así como interrupciones Hardware-Software que son la principal herramienta de programación para un DSP en aplicaciones que requieran procesamiento tiempo real. Se menciona esta ventaja entre ambos kits de desarrollo debido a que la curva de aprendizaje de Turbo ASM es mucho más larga y tediosa sin mencionar la de ANSI C++, y porque este proyecto es la base para futuros desarrollos en materia de Acústica y Cancelación Activa de Ruido, por lo cual es mas escalable cualquier desarrollo en C que en Assembler, además que este último es totalmente dependiente del set de instrucciones de cada familia de DSP's y de cada empresa que los fabrica.

Con la plataforma tecnológica seleccionada, se continuó con el desarrollo de muchas pruebas software para encontrar las limitantes de frecuencia de muestreo y de rango de excursión de la señal. Se encontró que el CODEC del kit de desarrollo para el DSP C6711 acepta una frecuencia de muestreo de 8KHz (se puede trabajar también a 11KHz modificando la frecuencia del reloj por hardware) y que el rango de excursión de la señal era (-1,1) volts los cuales eran congruentes con los valores que manejan los actuadores (parlantes) y sensores (micrófonos) utilizados en el proyecto actual. A continuación se realizaron varias pruebas a la arquitectura DSP-BIOS para encontrar las ventajas de utilizarla en el proyecto. Se concluyó que era necesaria para la aplicación, pues existen interrupciones software que activan las interrupciones hardware y estas deben estar sincronizadas mediante el reloj interno del kit de desarrollo, es decir, el hecho de realizar el software sin usar DSP-BIOS no aseguraba que el códec tuviese lista la muestra para procesamiento o para el envío al DAC para la posterior reproducción. El realizar el algoritmo usando bucles infinitos no asegura que siempre se pueda obtener una muestra o que se pueda reproducir. Con el kit de desarrollo del DSP C5402, se realizaron pruebas y solamente se obtuvieron resultados estables cuando se utilizaba dicha arquitectura, razón más para utilizarla en la tarjeta del DSP C6711.

Como información adicional a las pruebas desarrolladas, se trató en algún momento de implementar una aplicación de cancelación activa de ruido usando redes neuronales para reemplazar los algoritmos adaptativos que al final fueron implementados, pero no se continuó el desarrollo debido a que se requería concurrencia en el procesamiento y la arquitectura DSP no es la más indicada para este fin. La investigación en este tópico se suspendió pero se concluyó que la arquitectura FPGA es la que más se adapta a este tipo de soluciones, debido a que esta se orienta principalmente a aplicaciones concurrentes donde grandes volúmenes de información requieren ser procesados en paralelo, mientras que la arquitectura DSP se enfoca mas a solucionar problemas donde se requiera gran precisión y exactitud, pero no paralelismo entre procesos.

4. SIMULACIONES EN MATLAB DE ALGORITMOS LMS Y NLMS

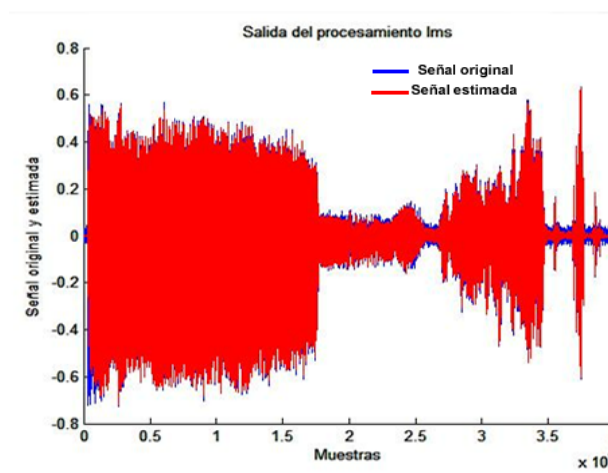


FIGURA 8: Respuesta de la simulación para el algoritmo LMS

En las simulaciones realizadas se pudo observar claramente que el algoritmo LMS se adapta con mucha velocidad a los cambios que sufre la señal de prueba. Esta señal es una grabación de distintas voces en un intervalo de 5 segundos. La señal no es de naturaleza periódica y aun así los resultados son de una adaptación casi perfecta entre ambas señales, la de contaminación auditiva (azul) y la estimada (roja) mediante el algoritmo adaptativo. Si estos resultados pudiesen obtenerse de igual forma en el dominio acústico, la cancelación activa de ruido permitiría que cualquier sonido, en cualquier banda espectral se atenuarse casi completamente. Después de hacer estas simulaciones se demostró que el funcionamiento del algoritmo es muy eficiente, pero no lo es cuando se saca del dominio eléctrico y se realizan las pruebas en el dominio acústico. Si la señal azul es la real y la roja la estimada se puede concluir que enfrentando ambas señales con un desfase constante de 180° , la cancelación sería casi absoluta, quedando un remanente de la señal original, mostrado en la Figura 9.

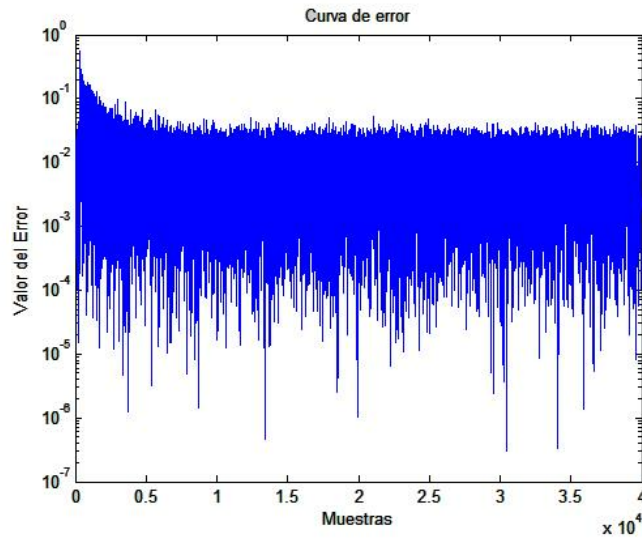


FIGURA 9: Curva de error para el algoritmo LMS

Se observa en la figura 9 que la curva converge a 10^{-2} volts para las primeras 500 muestras del procesamiento, y que después de ello se mantiene constante aun cuando la señal sigue variando en intervalos posteriores.

La elección del algoritmo adaptativo en el Cancelador implementado se baso en la máxima atenuación obtenida mediante alguno de los algoritmos.

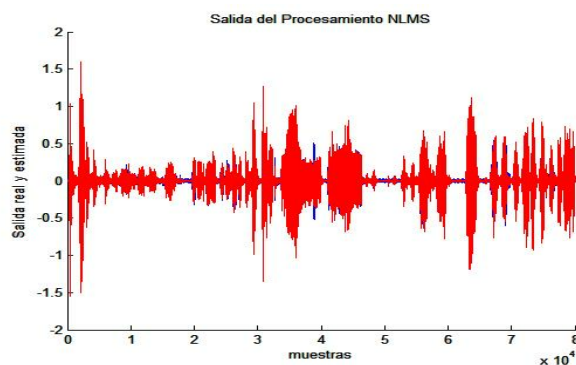


FIGURA 10: Respuesta de la simulación para el algoritmo NLMS

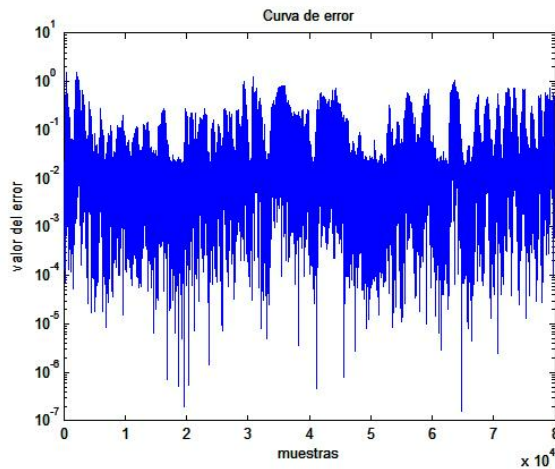


FIGURA 11: Curva de error para el algoritmo LMS

Dado que las simulaciones mostraron mejores resultados en el caso LMS que en el NLMS basando esta afirmación en la convergencia del algoritmo observada en la curva de error de cada uno, se implemento el algoritmo LMS afuera del dominio eléctrico y se pasó al dominio acústico, es decir, al espacio tridimensional dentro de la tarjeta de desarrollo del DSP C6711, para mostrar si se podían obtener resultados tan satisfactorios como los obtenidos dentro de un PC por medio de simulaciones. Tras muchas pruebas se encontró que la máxima atenuación obtenida mediante estos 2 algoritmos era de 5 dB, lo cual no superó los resultados obtenidos mediante el algoritmo seleccionado, el FXLMS, que logró atenuar un valor promedio de 20dB para frecuencias entre de 180Hz y 240Hz y en otra banda cercana a los 400Hz.

5. IMPLEMENTACION DEL CANCELADOR ACTIVO DE RUIDO

5.1. ALGORITMO ADAPTATIVO SELECCIONADO PARA IMPLEMENTAR EL CANCELADOR ACTIVO DE RUIDO *FXLMS FEEDBACK*

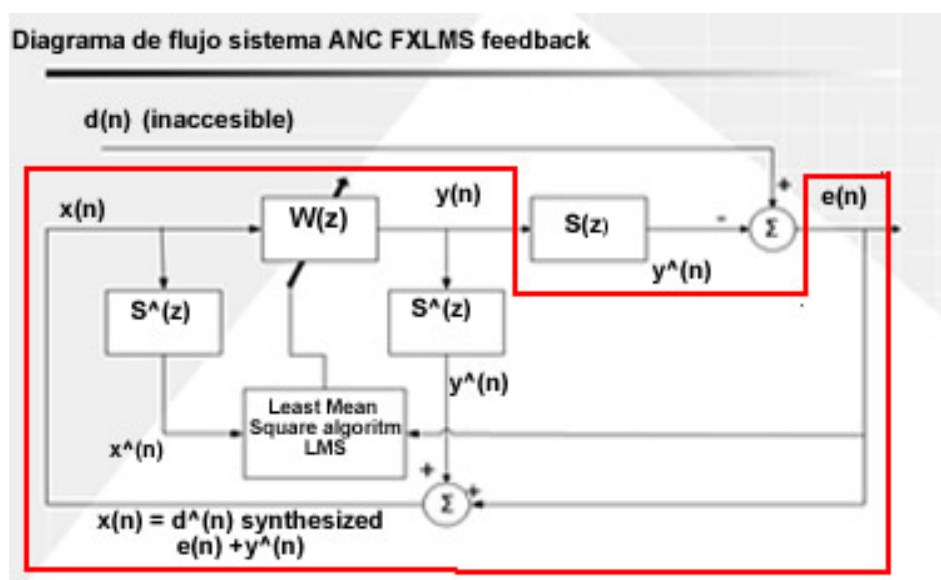


FIGURA 12: Esquema del Algoritmo FXLMS Feedback

Este algoritmo solo utiliza un sensor de referencia y se ubica cerca al parlante Cancelador para reducir el tiempo de retardo de la señal a través del camino acústico secundario. Este camino acústico secundario es simplemente la función de transferencia que recorre una señal acústica en el espacio tridimensional entre el parlante Cancelador y el micrófono sensor. Este efecto es indeseable puesto que la señal que se está generando mediante el parlante cancelador no debe interferir con la

señal de contaminación acústica que se intenta atenuar, y por ello se modela para poder eliminar su efecto. $Y[n]$ es la salida que se envía al actuador y cada muestra de esta señal es calculada mediante un algoritmo LMS, con la diferencia que en este caso las señales con las que se calcula $W[z]$ para poder filtrar $X[n]$ y obtener $Y[n]$ son señales previamente filtradas por $S^*[z]$, que es la función de transferencia estimada del camino acústico secundario ya mencionado. Es muy importante el efecto de este camino secundario, pues es el que le brinda estabilidad y convergencia al algoritmo, y permite ampliar la excursión de la señal de antisonido generada.

Hablar de camino acústico secundario obliga a pensar que existe un camino acústico primario en este proceso. Este último es simplemente el recorrido que la señal de contaminación acústica que se intenta eliminar, recorre en un espacio tridimensional, entre la fuente que la genera y el micrófono sensor que la capta para su posterior procesamiento.

En pruebas realizadas al algoritmo LMS Feedback comparándolo con el FXLMS Feedback, se observó que la máxima excursión de la señal de antisonido que podía ser generada sin llegar a la zona en la que la salida del Cancelador se saturaba, en el primer caso era mucho menor que en el segundo, además que este valor cambia si se varía la frecuencia de la señal de contaminación acústica que se intenta cancelar. Esta fue la primera razón para optar por implementar un Cancelador FXLMS Feedback. La segunda razón, igualmente importante, para seleccionar este algoritmo adaptativo fue que solo se contaba con una entrada analógica en el Kit del DSK TMS320VC6711, lo cual imposibilitó realizar pruebas utilizando algoritmos Feedforward, los cuales le agregan coherencia a la señal de antisonido generada, en comparación con los algoritmos Feedback que deben sintetizar la señal con base en la información acústica que proveen el camino acústico secundario y la señal captada por el micrófono de referencia, sin mencionar el camino acústico primario que para el caso Feedback es desconocido, como lo indica el diagrama del algoritmo, en el que $d[n]$ es inaccesible pues de lo contrario se necesitaría de otro micrófono sensor para captarla.

Se observa en el esquema del algoritmo FXLMS mostrado al principio de este tema que aparece una zona encerrada en línea roja, esto con el fin de diferenciar el dominio eléctrico del dominio acústico del Cancelador. Todo lo que aparezca dentro de la línea roja es eléctrico y se realiza dentro de la tarjeta de desarrollo, mientras que lo que está afuera de la línea roja sucede en el dominio acústico, es decir, en el espacio tridimensional sobre el cual se intenta generar la zona de cancelación acústica usando el actuador (parlante) y el sensor (micrófono).

Para el Cancelador activo de ruido implementado, el orden del filtro $W[z]$ y el de $S[z]$ es de 128, la frecuencia de muestreo del CODEC utilizado por la tarjeta de desarrollo es de 8KHz, y el comportamiento observado es principalmente NARROWBAND, es decir, solo permite atenuar picos espectrales aislados y no lo hace por bandas como si lo haría un Cancelador Activo BROADBAND. La razón principal para ello es que solo se implementó un parlante y un micrófono, y la máxima componente espectral dentro del rango operativo del Cancelador (0Hz – 500Hz) es captada por el micrófono y atenuada por el parlante cancelador, dejando las otras componentes casi inalteradas. El utilizar varios canales compuestos por muchos sensores y por actuadores aumenta la eficacia de la cancelación, sin embargo entra cada uno de dichos canales debe existir cierta correlación que permita eliminar los efectos negativos de los caminos acústicos secundarios entre cada uno de los actuadores y sensores involucrados.

El uso de canceladores activos de ruido muticanal exige en primera instancia la adquisición de una plataforma tecnológica lo suficientemente robusta para poder procesar todo el volumen de información captada por los sensores y necesaria por los actuadores para atenuar la banda de baja frecuencia en la que puede ser útil el control activo de ruido. Otra observación importante es que la determinación de las ubicaciones de cada sensor y de cada actuador en este caso, es un proceso bastante complejo y exige mucho tiempo y nuevas metodologías para poder generar un procedimiento actualmente inexistente, todo con el fin de obtener máxima atenuación acústica. El cálculo de caminos acústicos secundarios para cada actuador y para cada sensor en este caso debería hacerse en modo ONLINE, es decir, calcularse para cada cambio de

posiciones de actuadores y sensores, con el fin de poder modificar sus posiciones y así encontrar la configuración espacial de componentes que permita la máxima cancelación de ruido.

5.2. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CAMINO ACUSTICO SECUNDARIO $S^*[z]$

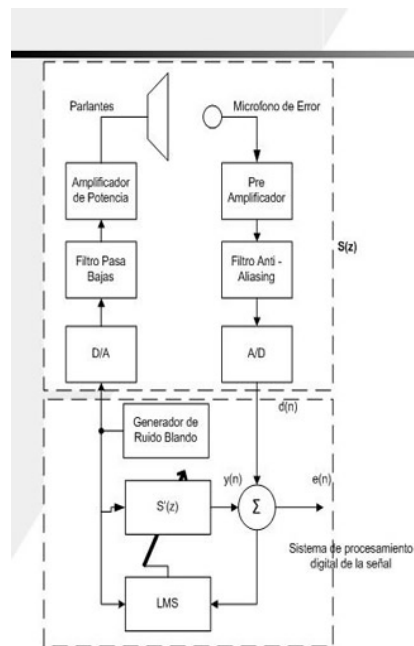


FIGURA 13: Esquema del Algoritmo para el Cálculo del camino acústico secundario

Hay dos maneras de calcular $S^*[z]$, uno es en modo offline y el otro en modo online. El primero, que fue el utilizado en el actual proyecto, se calcula una sola vez el camino secundario y se utiliza de ahí en adelante para toda la operación del Cancelador sin modificaciones. En el segundo, el camino secundario se calcula para cada muestra o conjunto de muestras según indique el algoritmo utilizado y permite mantener una operación convergente y estable aun cuando la planta de este proceso fuese modificada (fuentes de ruido en movimiento - fluidos turbulentos entre actuadores, sensores y fuentes de ruido). Evidentemente para el caso offline, la planta de este

proceso debe mantenerse inalterada para el correcto funcionamiento de todo el sistema.

A continuación se describen los pasos que el algoritmo de cálculo del camino secundario debe seguir:

- 1) Generar ruido blanco desde adentro del DSP
- 2) Reproducirlo mediante el parlante Cancelador
- 3) Capturar la señal de ruido blanco usando el micrófono de referencia en una posición específica, y dicha posición no debe modificarse desde este momento y debe mantenerse allí aun cuando el Cancelador esté funcionando
- 4) Generar la resta aritmética dentro del DSP $\rightarrow E[n] = D[n] - Y[n]$ mostrada en el esquema de la figura 13
- 5) Utilizar $E[n]$ (Resta previamente realizada) y $X[n]$ (Señal de Ruido blanco) para calcular mediante un algoritmo LMS el filtro $S[z]$.

Iterar por unos 60 segundos y guardar los valores de la respuesta al impulso del filtro $S[z]$ que es el camino acústico secundario buscado. Estos valores dependerán directamente de la distancia y posición a la que esté ubicado el micrófono con respecto al parlante.

Se busca que la distancia entre el parlante Cancelador y el micrófono de referencia sea mínima para que la señal de antisonido que llegue al micrófono sea lo más parecida a la señal generada por el parlante cancelador. De este modo se logra disminuir en gran medida el efecto negativo de capturar indiscriminadamente contaminación acústica proveniente de la fuente de ruido y antisonido desde el parlante actuador.

Para el Cancelador que se implementó, la conversión Analógico Digital, el filtro pasa bajos, el preamplificador y la conversión Digital Analógico son parte de la tarjeta de desarrollo del DSP C6711 utilizado, mientras que el amplificador de potencia mostrado está incluido en el parlante que fue utilizado como generador de antisonido.

El procedimiento descrito para el cálculo del camino acústico secundario simplemente busca encontrar la función de transferencia global del sistema incluyendo todos los componentes que hacen parte del proceso:

- DAC
- ADC
- DSP
- Filtro Pasabajos
- Filtro Antialiasing
- Amplificador de Potencia
- Sensor → Micrófono
- Actuador → Parlante

Con esta función de transferencia, que en el dominio temporal sería simplemente la respuesta al impulso, se puede obtener la señal que capturaría el micrófono de referencia y el proceso cancelaría con un 100% de efectividad. Desafortunadamente este no es el caso debido a muchas variables físicas que impiden la cancelación absoluta de sonido, como la forma del frente de onda de la contaminación acústica y la del antisonido. La falta de similitud entre ambos frentes de onda en el espacio crea irregularidades en el campo acústico generado después de activar el Cancelador, y ello causa que existan zonas donde se logra atenuación y otras donde aparece refuerzo de la señal original. Otra variable es el retardo entre ambas señales inherente al procesamiento del DSP, que si bien es muy pequeño, existe y le resta coherencia a ambas señales, reduciendo la eficacia de la cancelación. La forma del recinto cerrado donde se intenta generar la zona de silencio también afecta el camino acústico secundario, pues la respuesta modal (ondas acústicas estacionarias) de diferentes tipos de contaminación acústica permiten aumentar o disminuir la efectividad de Cancelador, tal que si se lograra modificar la forma tridimensional del recinto, el efecto cancelador se vería mejorado notoriamente, pero ese estudio no es el objetivo de la actual investigación.

5.3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS EN EL DSP C6711

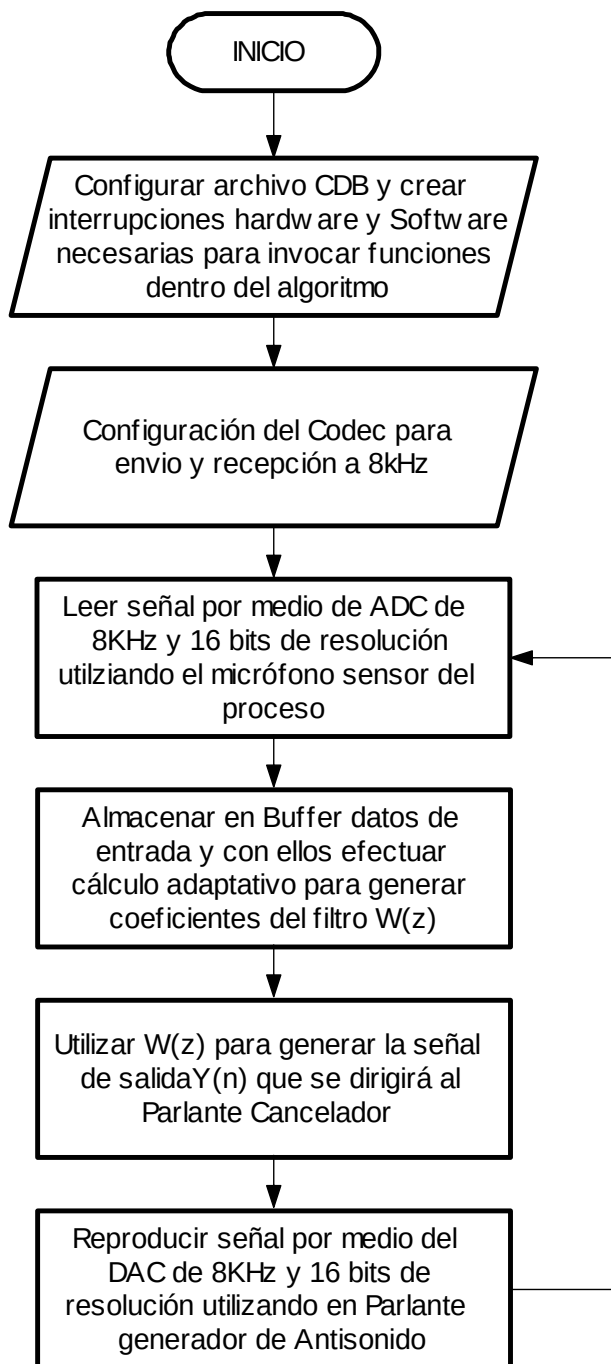


FIGURA 14: Diagrama de Flujo del Programa Implementado

Se muestra en este apartado el diagrama de flujo necesario para poner en funcionamiento el algoritmo adaptativo.

El programa escrito (FXLMS) en ANSI C++ está disponible en el Anexo B y a continuación se va describir de manera general su funcionamiento.

Como primer paso se debe configurar el archivo que relaciona el código escrito en el programa con la funcionalidad DSP-BIOS, la cual en este caso permite la sincronización de la señal del reloj interno de la tarjeta de desarrollo con el CODEC, para así asegurar una tasa de muestreo constante. Se configuran interrupciones por software que le permitan al DSP optimizar el llamado de funciones de procesamiento propias del algoritmo adaptativo, muestreo de la señal de entrada y posterior envío de la señal de salida utilizando el CODEC.

Posteriormente se deben actualizar los coeficientes del filtro adaptativo $W[z]$, generar la señal $Y[n]$ y dirigirla al parlante Cancelador para reproducirla, para de nuevo muestrear la señal remanente o error usando el micrófono de referencia del algoritmo.

5.4. DESCRIPCION DEL MONTAJE NECESARIO PARA REALIZAR EL EXPERIMENTO

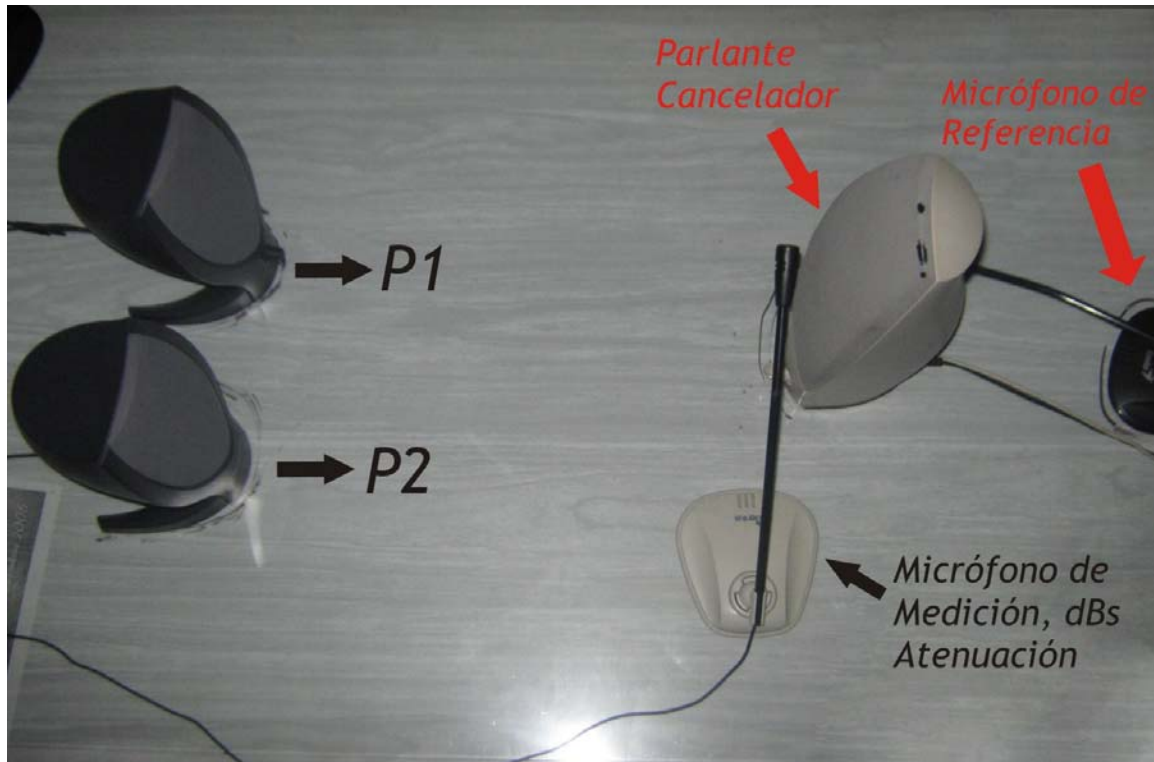


FIGURA 15: Fotografía del Cancelador Activo de Ruido Implementado

- 1) **P1 y P2:** son las fuentes de ruido en el experimento, sirven para generar contaminación acústica entre 50Hz y 500Hz. Para frecuencias menores los sensores (micrófonos) no son lo suficientemente sensibles y no fue posible percibir tales señales.
- 2) **Parlante Cancelador:** Es el actuador del lazo de control que se intenta implementar con el Cancelador activo de ruido. Permite reproducir la señal de anti-sonido que va a interferir con la contaminación acústica generada por P1 y P2.

- 3) **Micrófono de Referencia:** Es el sensor del lazo de control en el Cancelador y permite sensar la señal proveniente de los parlantes generadores de ruido y buscar la señal optima mediante el algoritmo adaptativo para posteriormente reproducirla usando el parlante Cancelador. A medida que la señal que capta el micrófono de referencia disminuye, el algoritmo se estabiliza y deja de modificar la señal de salida. Su ubicación es a 30 cm atrás del parlante cancelador
- 4) **Micrófono de Medición dBs:** Simplemente se usa para determinar la intensidad sonora en decibeles en el punto donde se ubica, permitiendo cuantificar la eficiencia en la operación del Cancelador Activo de Ruido.
- 5) **TMS320VC6711 DSK Teaching Kit:** El cerebro del lazo de control. Se encarga de capturar la señal censada por el micrófono de referencia, procesar un buffer de entrada y con este generar mediante un algoritmo adaptativo una única muestra de la señal de salida para finalmente convertir a señal analógica la señal resultante para ser reproducida por el parlante Cancelador y generar cancelación en la zona cercana al actuador y al sensor.
- 6) **Generador de Señales:** Se utilizó el script de Matlab daqfcngen para generar señales Senoidales, Cuadradas, Sawtooth, Sinc y Chirp entre 50Hz y 500Hz con el fin de obtener la contaminación auditiva que se intenta eliminar.

A continuación se muestra un esquema en el que se aclaran todas las partes componentes del Cancelador Activo de Ruido implementado:

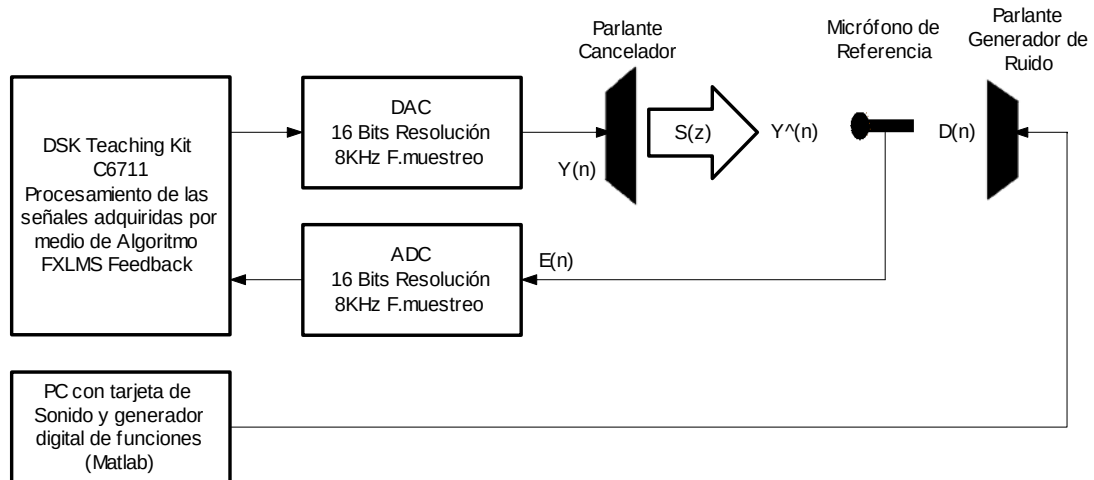


FIGURA 16: Diagrama del Cancelador Activo de Ruido Implementado

En este esquema se puede ver claramente el lazo cerrado que se intenta controlar mediante el algoritmo adaptativo previamente seleccionado. Se inicia en el Parlante Cancelador que reproduce la señal $Y[n]$ procesada mediante el algoritmo FXLMS Feedback, continua por medio del aire recorriendo el camino acústico secundario hasta llegar al micrófono de referencia o sensor del lazo de control que muestrea la señal $E[n]$. Continúa a través de ADC y entra al DSP. En el DSP esta señal es procesada para de nuevo generar una salida $Y[n]$ que cierra el lazo del proceso.

Se observa que la señal que se envía al parlante Cancelador es $Y[n]$, pero después de recorrer el camino secundario se modifica por $Y^{\wedge}[n]$, lo cual exige una muy buena aproximación de $S[z]$, de otro modo no se van a lograr resultados satisfactorios. La modificación de $S[z]$ o incluso la eliminación de su efecto en el algoritmo con fines investigativos, generaba resultados nada satisfactorios en los que la salida $Y[n]$ crecía hasta saturar la salida de DAC y suspendía la operación de Cancelador.

Algo para tener en cuenta en el momento de realizar pruebas con el Cancelador Activo implementado es que así como en un lazo de control clásico se pueden presentar inestabilidades y la ganancia del controlador puede crecer indefinidamente generando una señal de gran amplitud pero indeseable, en este proceso acústico puede ocurrir lo

mismo por la ubicación del sensor, del actuador y por los niveles de intensidad sonora de las señales acústicas involucradas (Ruido y Antisonido). El ubicar correctamente ambos elementos y realizar un modelado de camino acústico secundario satisfactorio elimina estas inestabilidades. Se habla de dicho punto porque este resultado indeseable de una aparente resonancia en frecuencias cercanas a las que se intentan eliminar se puede encontrar si se aumenta abruptamente la ganancia del amplificador de potencia que gobierna el parlante Cancelador, o si la señal de contaminación acústica crece y se sale de los límites para los que se controla el funcionamiento del Cancelador. En el caso del Cancelador activo implementado, si la señal de entrada supera los 8dB la salida se satura debido a un efecto de redondeo numérico del DSP y del CODEC que digitaliza la señal. También si se aumenta la ganancia del amplificador de potencia del actuador a valores superiores a 8dB, la señal de antisonido diverge y rápidamente se satura la salida del CODEC, lo cual bloquea la tarjeta de desarrollo y es necesario un proceso de recarga del programa en la memoria del DSP para volverlo a poner en funcionamiento.

5.5. OBSERVACIONES ACERCA LAS POSICIONES DEL SENSOR Y EL ACTUADOR

Uniando todos los elementos que conforman el montaje y seleccionando el algoritmo de cancelación activa que se va a implementar para lograr atenuación de niveles sonoros, se iniciaron una serie de pruebas buscando las posiciones óptimas del micrófono de referencia (sensor) y el parlante Cancelador (actuador) para observar resultados.

Desafortunadamente no hay un procedimiento prescrito o un algoritmo para encontrar dichas posiciones y así lograr cancelación activa de ruido apreciable, la bibliografía existente simplemente habla de posiciones conocidas a priori y pues esta expresión obliga a utilizar la prueba y error para encontrarlas.

Es así como se observó que después de modelar el camino secundario entre el parlante y el micrófono muchas veces, existía una zona para la cual era prohibido ubicar el micrófono y era al frente del parlante. Como se mencionó anteriormente se intentó modelar el camino secundario para la ubicación clásica del parlante con el micrófono al frente pero no hubo resultados satisfactorios, pues se generaba retroalimentación acústica entre el parlante Cancelador y el micrófono de referencia. Las pruebas indicaron que ubicando el micrófono atrás del parlante se podía ampliar la excursión de la señal de antisonido hasta cierto nivel de intensidad sonora, después del cual se encontraba el Cancelador en estado de retroalimentación acústica excesiva y dejaba de funcionar satisfactoriamente, todo porque el antisonido saturaba nuevamente la señal captada por el micrófono de referencia y esta reemplazaba el ruido que se intentaba cancelar.

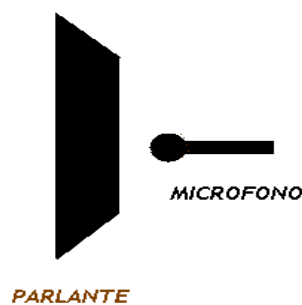


FIGURA 17: Ubicación relativa Parlante/Cancelador

La posición de los parlantes P1 y P2 fueron modificadas varias veces y este cambio no alteró el funcionamiento del Cancelador. Variaciones de las posiciones del Parlante Cancelador o del micrófono de referencia afectaban negativamente el desempeño del Cancelador, todo porque se alteraba el camino acústico secundario existente entre ambos elementos del lazo de control y este fue modelado previamente y no hay opción dentro del algoritmo seleccionado para modificarlo dinámicamente.

6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS CUANTITATIVOS OBTENIDOS

Se realizaron pruebas al Cancelador activo de ruido en el rango comprendido entre 50Hz y 500Hz y los resultados se muestran en el anexo B de este trabajo entregado con el CD. Se almacenaron diez segundos de sonido antes y después de la cancelación activa además de los respectivos espectros para cada señal, mostrando en muchos casos una atenuación de los niveles de intensidad sonora.

A continuación se muestran algunos espectros de señales procesadas acústicamente con el Cancelador activo de ruido.

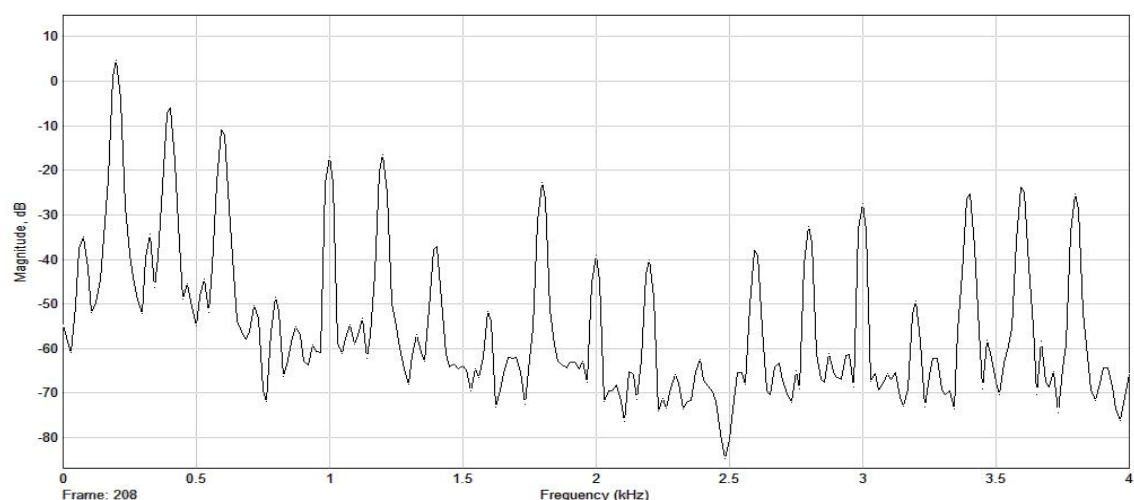


FIGURA 18: Espectro de Señal SAWTOOTH 200Hz antes de la cancelación

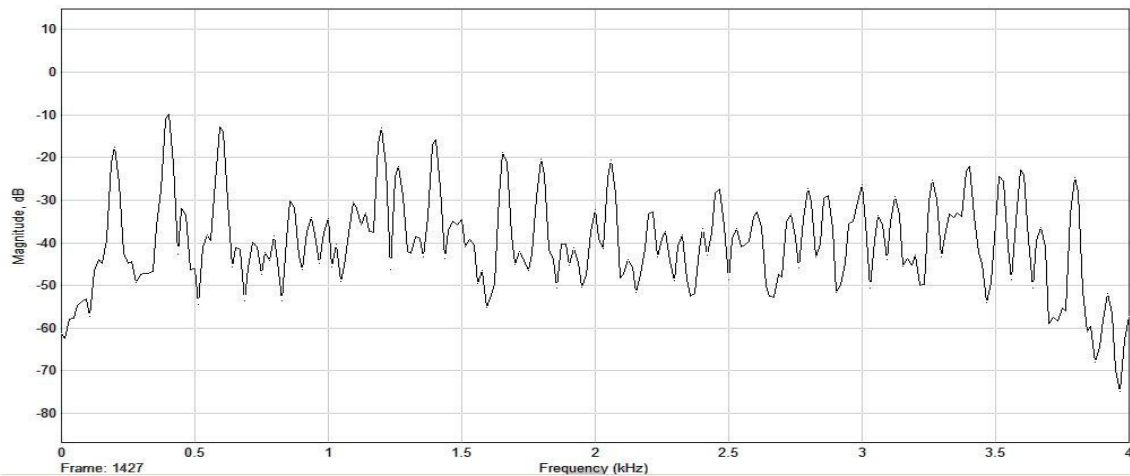


FIGURA 19: Espectro de Señal SAWTOOTH 200Hz después de la cancelación

Se observa del espectro de esta señal que hay muchas componentes en diferentes frecuencias, pero el objetivo de la cancelación activa de ruido es reducir los decibeles de las componentes espectrales para los primeros 500Hz de la señal. De los resultados mostrados en ambos espectros se nota una reducción en cada pico espectral pero solo para frecuencias menores a 500Hz, sin embargo para valores de frecuencia mayor no necesariamente sucede lo mismo y hay refuerzo de la señal. Este es en esencia el funcionamiento del Cancelador activo de ruido basado en el algoritmo FXLMS Feedback, se encarga de reducir los niveles de intensidad de la señal sonora al frente del parlante Cancelador para el rango de frecuencias mencionado, sin preocuparse por el resto de frecuencias audibles, pues para ellas las técnicas de cancelación activa de ruido son innecesarias y las técnicas de cancelación pasiva de ruido son mucho más eficaces.

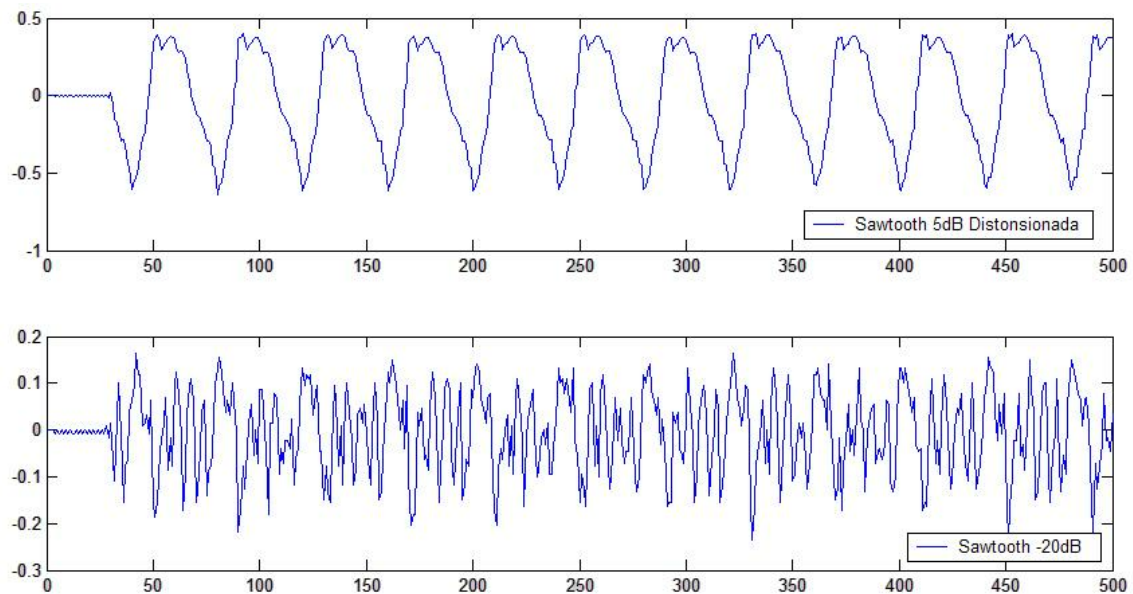


FIGURA 20: Señal SAWTOOTH 200Hz en el dominio temporal antes y después de la cancelación

En el dominio temporal se ve claramente la reducción de los niveles RMS de la señal original, el valor máximo pico a pico se redujo de 1 voltio a 0.2 volts además se nota la aparición de muchas componentes de alta frecuencia por el aumento de los cruces por cero de la señal atenuada en comparación a la señal original. Estos resultados fueron censados por el micrófono de medición de decibeles que se describió previamente, ubicado al frente del Parlante generador de Antisonido. Modificando la posición de dicho sensor se alteraban los resultados y se concluyó que la zona de silencio generada es aproximadamente una región de 2 centímetros cúbicos cerca al micrófono.

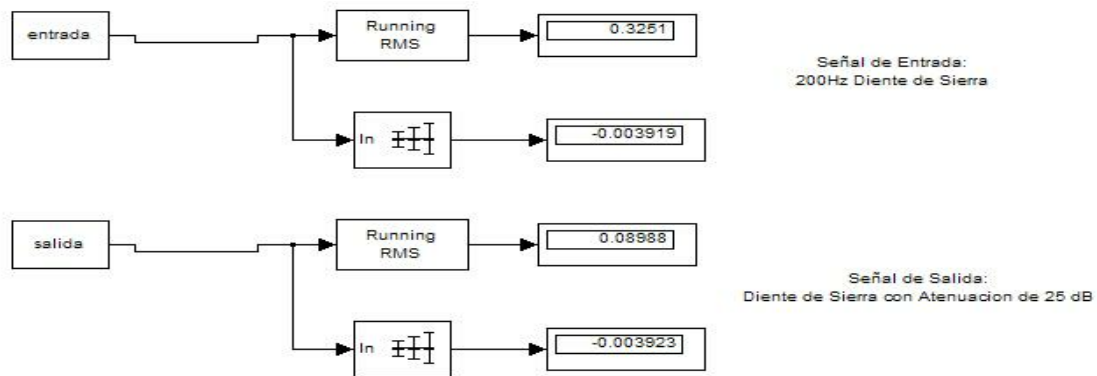


FIGURA 21: Señal SAWTOOTH 200Hz → Valores RMS y Media

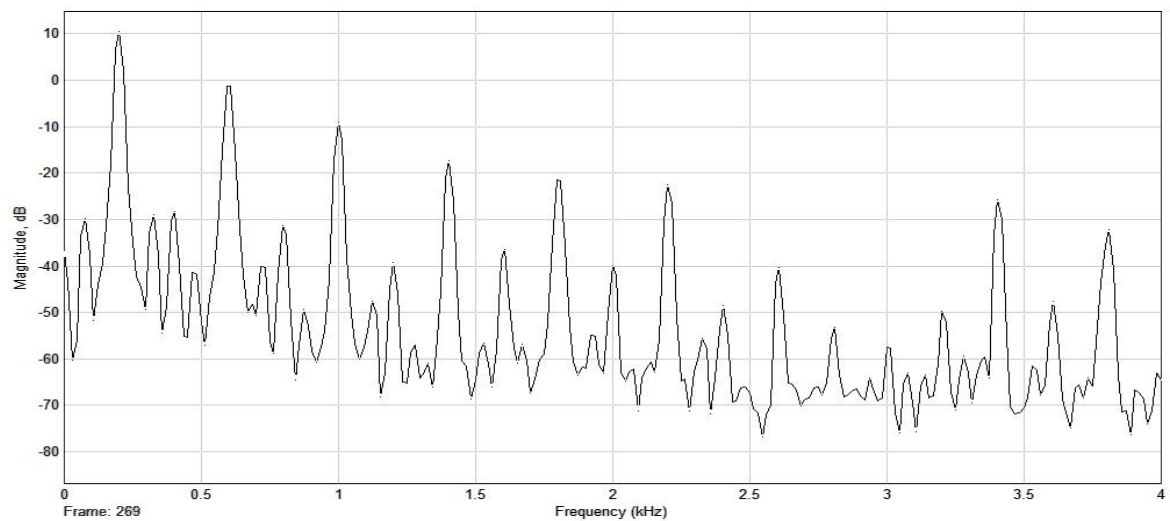


FIGURA 22: Señal Senoidal 200Hz antes de la cancelación activa

A continuación se muestra el mejor resultado en materia de atenuación acústica obtenido con el actual Cancelador activo de ruido, la señal de entrada es una senoidal de 200Hz con intensidad de 10dB.

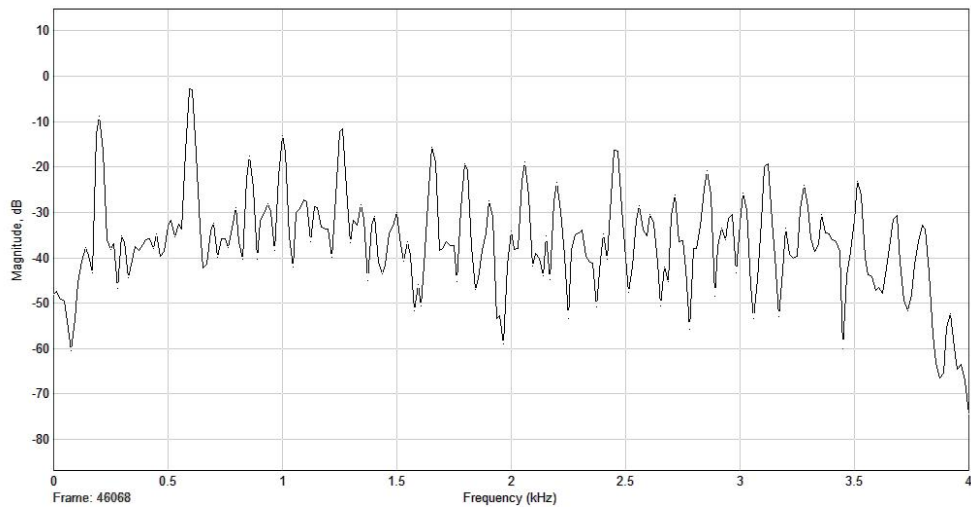


FIGURA 23: Señal Senoidal 200Hz después de la cancelación activa

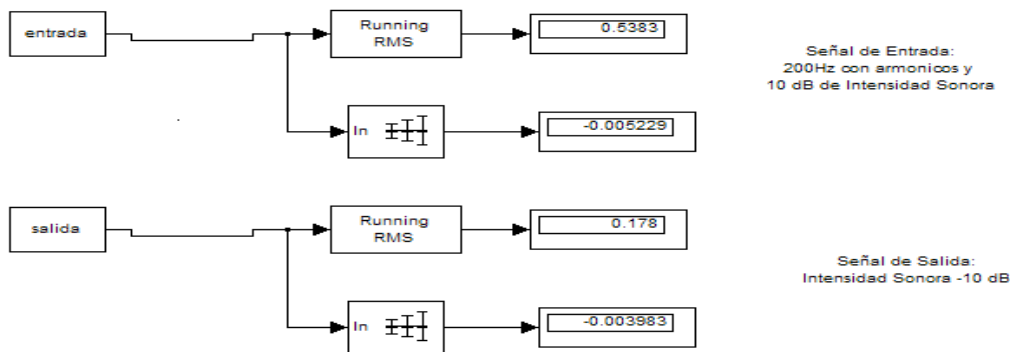


FIGURA 24: Señal Senoidal 200Hz → Valores RMS y Media

De nuevo se observa la atenuación de las componentes espectrales para la banda de 0Hz a 500Hz, mientras que hay un aumento de nivel espectral de las componentes de frecuencias mayores a 1Khz. De nuevo se aclara que estas mediciones fueron realizadas al frente del parlante Cancelador dentro de un recinto cerrado. El modificar la posición del micrófono para medición de decibeles reveló que para zonas distintas al frente del parlante generador de antisonido, habían refuerzos y atenuaciones que no dependen necesariamente de la distancia entre el punto de escucha y la fuente de ruido, sino de las crestas y los valles que la superposición de ondas sonoras, la de contaminación acústica y la de antisonido generan. Esto se conoce como sombras

sonoras y como en el caso óptico existen los fenómenos de interferencia, difracción reflexión que permiten explicar físicamente el origen de dichas zonas. El actual proyecto de grado no se orientó a explicar la aparición de dichas sombras, dado que es un procedimiento de gran complejidad teórica y por los muchos cálculos numéricos para su determinación, utilizando para ello ecuaciones diferenciales parciales (ecuación de onda para medios materiales en un gas de presión y de desplazamiento) además de las condiciones de contorno que dependen en gran parte de la geometría del recinto cerrado, del medio de propagación de las ondas de sonido, el estudio que ello representa se sale de los objetivos del actual proyecto de grado.

A continuación se muestra el resultado para una señal triangular de 200Hz

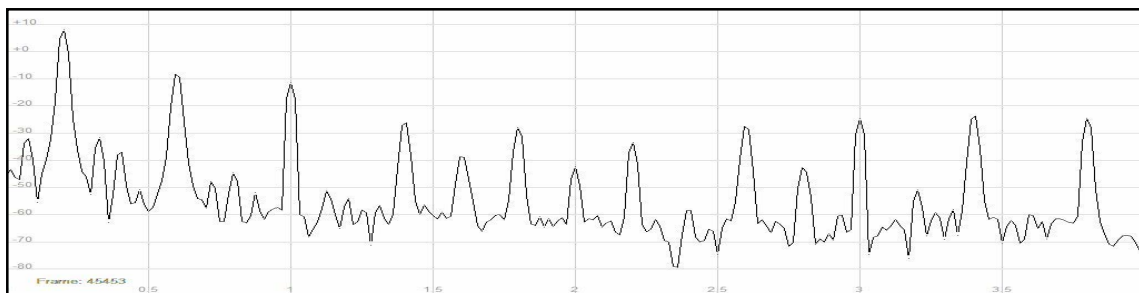


FIGURA 25: Señal Triangular 200Hz antes de la cancelación

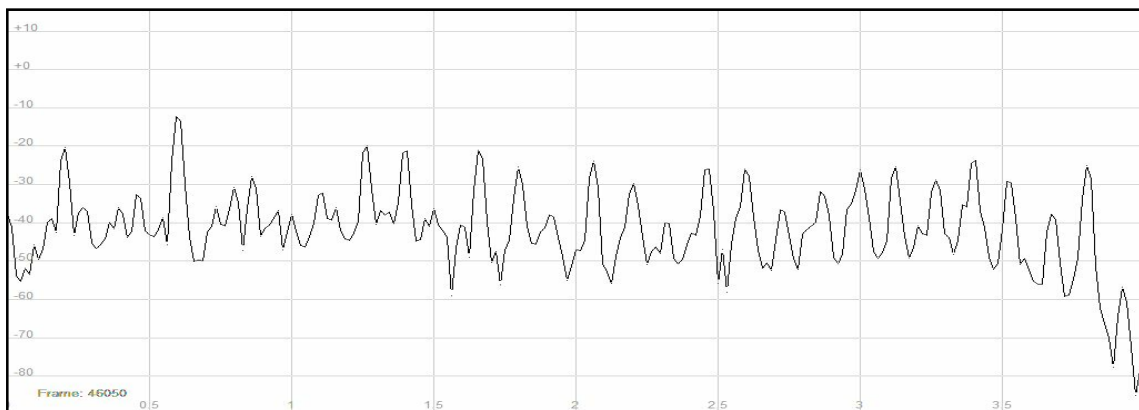


FIGURA 26: Señal Triangular 200Hz después de la cancelación

Para la frecuencia de 200Hz el Cancelador activo implementado presenta la máxima eficiencia en materia de atenuación acústica para el punto de medición de intensidad sonora (al frente de los parlantes). Se observa que para el caso de la triangular se logra una atenuación del principal pico espectral de 25dBs.

Finalmente se muestran los resultados del Cancelador para una señal senoidal de 390Hz

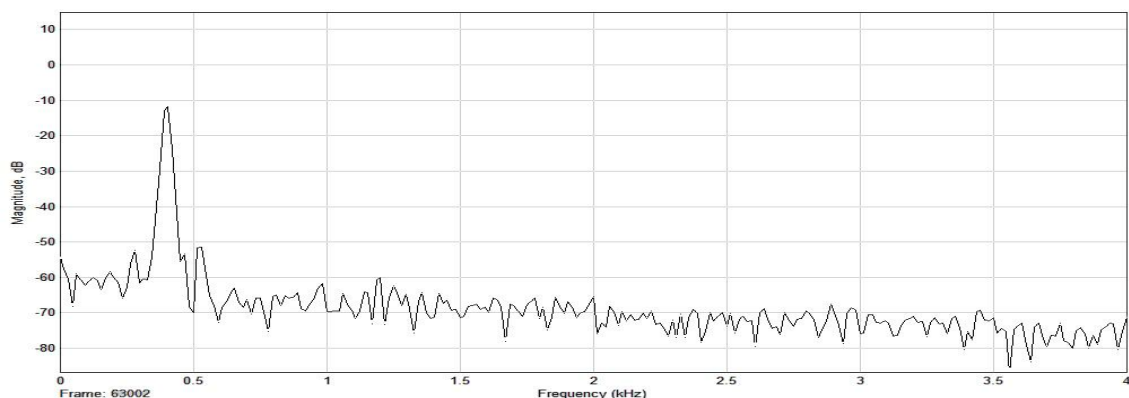


FIGURA 27: Señal Senoidal 390Hz antes de la cancelación

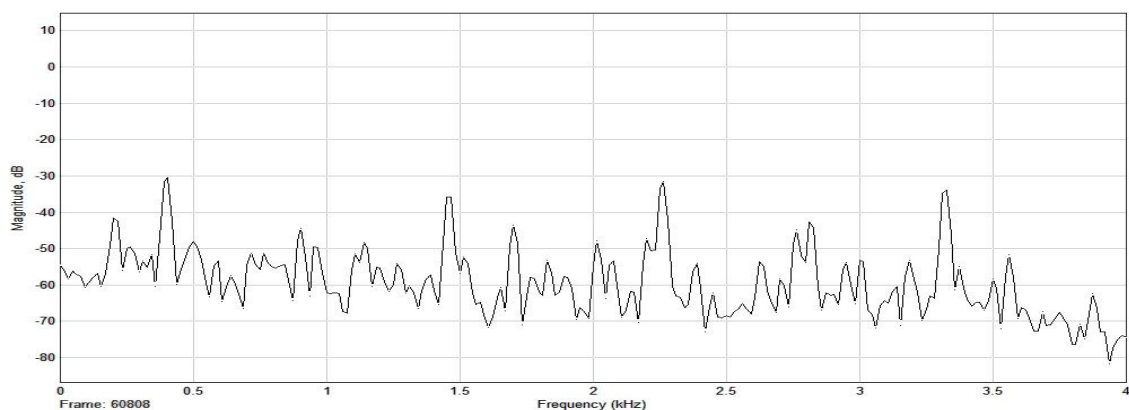


FIGURA 28: Señal Senoidal 390Hz después de la cancelación

Para el caso de la senoidal de 390Hz se logra una atenuación de 15dBs dentro de la banda espectral, claro que para frecuencias mayores a 1KHz aparecen picos que no existían en la señal original. De nuevo se hace énfasis en que ese efecto es esperado y

puede eliminarse fácilmente utilizando técnica de cancelación pasiva como obstáculos, materiales porosos que reduzcan la intensidad sonora como el Instamol muy utilizado actualmente en la industria para la protección del sistema auditivo del personal expuesto a altos niveles de contaminación acústica.

A continuación se muestra un barrido en la frecuencia realizado al Cancelador activo de ruido en el cual se observan los distintos valores de atenuación o refuerzo de la intensidad sonora de la señal al frente del parlante Cancelador. Se realizó un muestreo cada 10 Hz entre 60 y 500Hz. Los resultados obtenidos muestran que hay atenuación acústica máxima para un valor de 200Hz y una amplificación acústica máxima para un valor de 70Hz. Con esta gráfica se muestra que la cancelación activa es selectiva en la frecuencia y que no siempre los resultados obtenidos son los que se desean.

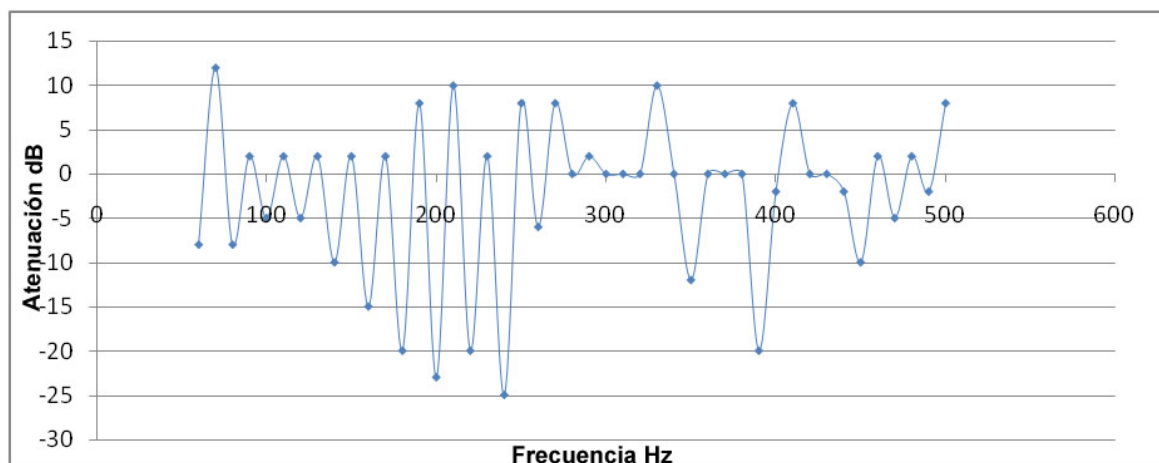


FIGURA 29: Decibeles de Atenuación de la señal resultante vs frecuencia en Hertz

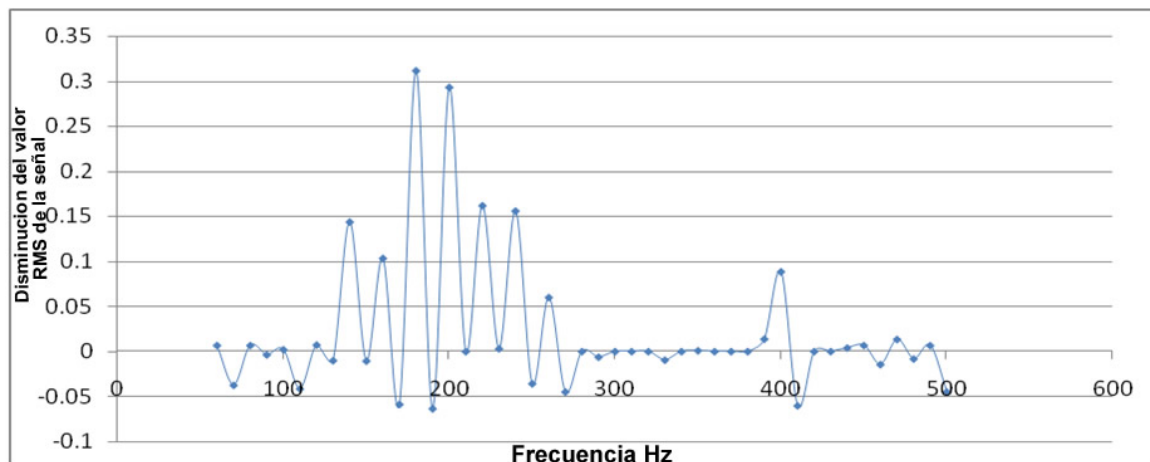


FIGURA 30: Reducción del Valor RMS de la señal resultante vs frecuencia en Hertz

Los resultados mostrados en las figuras 21 y 22 se pueden corroborar calculando la diferencia entre picos espectrales y el valor RMS de la señal antes y después de la cancelación activa de ruido. La información necesaria para ello se provee en el Anexo A.

La eficacia del proceso de cancelación activa depende de muchos factores entre los cuales citamos los que más afectaron el desempeño del Cancelador:

- La señal que genera el algoritmo adaptativo debe estar desfasada 180° de la señal que intenta eliminar para poder obtenerse la interferencia destructiva que se busca. Esto no se logra siempre pues la precisión numérica del DSP tal que se pueda mantener la inversión de fase de la señal de antisonido comparada con la de contaminación acústica.
- El tamaño de los parlantes y la caja de resonancia con la que cuenta modifican en gran medida los valores de atenuación que se pueden obtener.
- Las dimensiones del recinto cerrado en el que se realizó el experimento,
- El camino acústico secundario y la distancia entre el actuador y el sensor del experimento,
- La respuesta modal que exhibe el recinto cerrado donde se realizaron los experimentos.

Dependiendo de la frecuencia de la perturbación y de las dimensiones del recinto cerrado se presentan 2 fenómenos que determinarán la forma de propagación:

- Respuesta de Campo Modal
- Respuesta de Campo Difuso

En el primer caso, la longitud de onda de las perturbaciones es múltiplo de alguna de las dimensiones del recinto lo que da origen a ondas estacionarias entre dos paredes paralelas, generando una superposición entre las distintas reflexiones que la onda experimente, dando lugar a zonas donde hay picos de intensidad y otras donde hay silencio. En el segundo caso las longitudes de onda son muy pequeñas y los modos, aunque siguen apareciendo cubren zonas insignificantes, en comparación con las dimensiones del espacio cerrado lo cual se observa al medir la intensidad de las ondas sonoras que permanecen casi constantes en todas las direcciones.

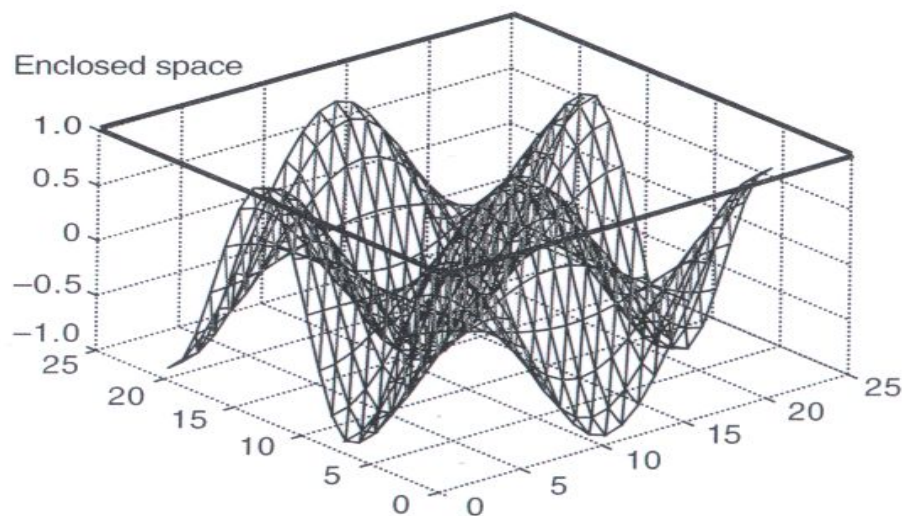


FIGURA 31: Respuesta modal de una onda sonora en un espacio cerrado, tomada de la bibliografía 2

La razón para obtener refuerzo de la intensidad sonora en los valores de frecuencia 70Hz, 90Hz, 110Hz, 130Hz, 150Hz, 170Hz, 190Hz, 210Hz, 230Hz, 250Hz, lo cual se puede observar en la gráfica 15, es la respuesta modal de las ondas sonoras entre el

par de paredes adelante y atrás del parlante Cancelador y del micrófono de referencia. Esto simplemente indica que la zona de silencio se ha desplazado con respecto al parlante cancelador y en vez de ubicarse un valle en dicho lugar, el refuerzo que se observa es debido a que allí se forma parte de la cresta de algún otro modo de vibración. Aunque no se realizó ningún estudio en acústica, ni se caracterizó el espacio cerrado en el cual se realizó el experimento, ya que solo se centró el interés en un punto de dicho recinto y en la máxima atenuación que se pudiese lograr allí, el efecto solo se observa para frecuencias lo suficientemente bajas como para poder generar un campo acústico con comportamiento modal y hubiese bastado mover el micrófono de medición de decibeles (no el de referencia porque es el sensor del algoritmo y sirvió para calcular el camino acústico secundario) hasta encontrar puntos de atenuación o valles de los ya mencionados modos acústicos.

7. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

- De los resultados que se obtuvieron en todas las pruebas implementadas se observó que los algoritmos que no modelaban el camino acústico secundario y que eran Feedback (un solo sensor y un solo actuador) tales como el LMS y el NLMS atenuaban como máximo 5 [dB] (razón por la cual no se mostraron dichos resultados en el presente trabajo) mientras que el algoritmo seleccionado permitió valores máximos entre 5 [dB] hasta 25[dB] para la banda efectiva de cancelación activa (0Hz → 500Hz).
- No se pudieron realizar pruebas con algoritmos Feedforward debido a la carencia de un segundo canal analógico de entrada para realizar pruebas dentro de la tarjeta de desarrollo, pues no se tuvo acceso a otra tecnología que permitiese 2 canales analógicos de entrada y uno de salida y al mismo tiempo se lograrán tiempos de procesamientos tan bajos como los observados con el kit de desarrollo del DSP C6711.
- Cuando el Cancelador activo de ruido se activaba, el modificar las posiciones de los parlantes generadores de contaminación sonora no alteró el desempeño del proceso, mientras que al cambiar levemente la posición del parlante Cancelador o del micrófono de referencia generaba inestabilidad en el algoritmo pues el camino acústico secundario se había modificado y era insuficiente el modelado previamente realizado para lograr la inversión de fase entre ambas señales.
- El modelado del camino acústico secundario en un algoritmo adaptativo, tiene el efecto de mantener el resultado de la cancelación en una zona determinada y aproximadamente inmóvil, mientras que algoritmos como el LMS o NLMS no ubican la zona de silencio en frente del parlante y esto dificulta las labores de medición de la atenuación acústica obtenida, se requeriría de muchas mediciones que abarcaran todo el espacio cerrado para determinar en qué punto

se ubica la zona de atenuación acústica, y este procedimiento debe repetirse para cada frecuencia de la señal de ruido que se intenta cancelar, convirtiéndose en un problema si lo que se intenta es generar atenuación cerca a los oídos de personal expuesto a ruidos indeseables.

- En el desempeño del Cancelador activo de ruido existen 2 factores que limitan su rango de operación y son:
 - 1) Saturación del CODEC que captura la contaminación acústica que se intenta eliminar. Desafortunadamente este valor no se mantiene constante para todas las pruebas realizadas al sistema. Inicialmente se podían captar señales de 10 dB de intensidad e incluso un poco mayores hasta que se saturaba el convertidor analógico digital incluido en el kit de desarrollo del DSP, pero en otros casos este valor se redujo hasta 5 dB y si se aumentaba la potencia del ruido a eliminar, el Cancelador dejaba de operar correctamente y solo reproducía ruido aleatorio de alta frecuencia.
 - 2) Retroalimentación acústica entre el actuador y el sensor del proceso. Sucede cuando la señal de antisonido supera cierto umbral de intensidad y el camino acústico secundario no puede separar la señal generada de la indeseada y se retroalimenta hasta desestabilizarse, dejando de operar correctamente. El umbral mencionado depende de la frecuencia de la perturbación que se intenta atenuar pero normalmente se presenta cuando la señal atenuada alcanza una intensidad de -20 dB. Para algunas frecuencias es menor y para otras mayor.
- Se realizaron varias pruebas al cancelador activo de ruido implementado y se obtuvieron atenuaciones muy por encima del promedio de 20 dB que es la atenuación promedio para la banda entre 160Hz y 300Hz. Valores como 40dB de atenuación pudieron ser percibidos y los resultados se muestran a continuación:

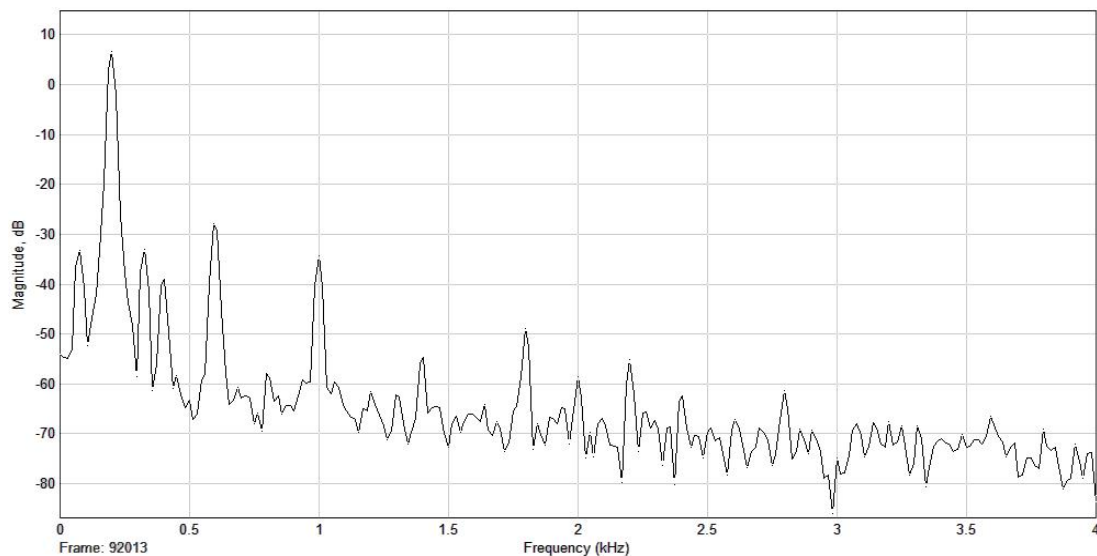


FIGURA 32: Senoidal antes de la cancelación activa

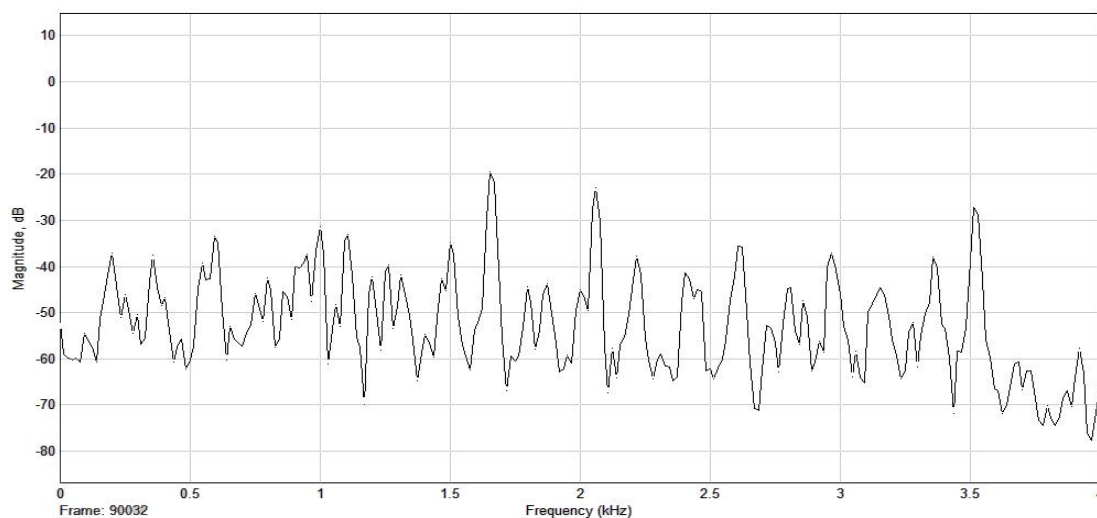


FIGURA 33: Senoidal después de la cancelación activa

Estos resultados no se muestran como parte de los resultados cuantitativos obtenidos debido a inestabilidades en la operación del cancelador, las que en algunos casos permitieron reproducir este efecto pero en otros casos no. Aun cuando se mantenían las mismas condiciones físicas el campo acústico generado por el algoritmo respondía de formas distintas y alcanzaba a atenuar

sólo hasta 20 dB. Después de muchas pruebas se concluyó que este resultado se observa únicamente cuando la precisión numérica del cancelador permite captar señales de 10 dB sin saturarse y sin desestabilizarse por la falta de dicha precisión en las iteraciones del algoritmo adaptativo seleccionado, el cual requiere muchos ciclos de procesamiento para obtener cada muestra de la señal de anti sonido generada.

CONCLUSIONES

- La cancelación activa de ruido es un procedimiento adaptable a muchas situaciones donde se requiera la atenuación de niveles de contaminación auditiva elevada, especialmente a situaciones que involucren a la industria, donde los altos niveles de ruido reducen la concentración de los trabajadores además de generar problemas de salud a mediano y largo plazo.
- Se indica en el título del proyecto que se trabajaría con señales pseudoperiódicas tales como las utilizadas para realizar las pruebas, de tal forma que el problema se limitara a realizar un filtrado acústico espacial y no temporal, es decir, un filtrado de una perturbación sonora en un determinado lugar, sin embargo el permitir ligeras variaciones a las señales periódicas, como por ejemplo modificar la frecuencia repentinamente, no tiene un efecto representativo en la operación del algoritmo y continua cancelando, siempre que esta variación se mantenga dentro de la banda donde es efectiva la cancelación activa de ruido (0Hz → 500Hz).
- El procesar señales no periódicas para generar cancelación activa de ruido requiere mucha velocidad de procesamiento para que se logre convergencia de los algoritmos adaptativos utilizados por estas técnicas. Es más efectivo en estos casos el uso de algoritmos predictivos que tengan suficiente información de la planta y del tipo de perturbación que intentan atenuar, para sintetizar dichas señales y generarlas al mismo tiempo que estas son causadas por sus fuentes.
- El Cancelador activo de ruido implementado utiliza dos fenómenos físicos para reducir los niveles de intensidad sonora de la contaminación acústica objetivo: La interferencia destructiva que confronta frentes de onda coherentemente reduciendo la amplitud efectiva del sonido percibido y el desplazamiento de parte de la potencia espectral de las componentes acústicas de la banda en la que trabaja el Cancelador a bandas de frecuencia más alta donde técnicas pasivas son efectivas y las activas inútiles.

- Las posiciones de los sensores y actuadores en un Cancelador activo de ruido como el implementado o más robusto, ya sea por el algoritmo utilizado o por la tecnología en la cual se haya desarrollado, deben ser determinadas con mucha precisión y exactitud para lograr los resultados de cancelación acústica buscados, pues de otro modo solo se obtendrán señales de gran amplitud incoherentes en comparación con la que se intenta atenuar.
- La correcta determinación del algoritmo utilizado para desarrollar un proceso de cancelación activa de ruido está completamente relacionada con una buena búsqueda bibliográfica y con el actualizarse constantemente acerca del estado del arte en este tema.
- La plataforma tecnológica sobre la cual se va a desarrollar el Cancelador activo de ruido debe ser una decisión tomada con base en los fines que se buscan. Si se busca generar una zona de silencio amplia o al menos mayor a la generado por el Cancelador implementado en este proyecto (2 cm^3), se requiere mucha capacidad de procesamiento y precisión numérica para poder implementar un Cancelador Activo de varios canales correlacionados entre sí y distribuidos espacialmente de cierta forma buscando máxima atenuación acústica, de modo que el resultado de cada canal independientemente no interfiera con los demás y el efecto general sea el esperado. Si solo se busca eliminar el sonido en la zona cercana al oído como en el caso de unos audífonos generadores de antisonido, tal como los patentó Bosé, no se requieren varios canales pero si un tipo de parlantes y micrófonos con una respuesta en frecuencia bastante plana en la zona entre 0Hz y 500Hz, además de una altísima velocidad de procesamiento y precisión numérica.
- Es muy importante el modelado de los caminos acústicos que deben recorrer los sonidos involucrados en el proceso de cancelación, tanto el ruido indeseable como el antisonido generado. En el Cancelador implementado la estabilidad es un factor crucial que fue resuelto en parte gracias al correcto modelado del camino acústico secundario pues si se modificaba levemente la planta como por ejemplo ubicar la cabeza cerca del parlante para escuchar su efecto, los resultados normalmente eran imperceptibles, pero en otros casos se reducía los decibeles de atenuación o se

desestabilizaba el funcionamiento del sistema. Esta es una razón para que en posteriores desarrollos en este tema se utilicen algoritmos en los que el modelado del camino secundario se haga en modo online y permitan la variación de la planta del proceso, y del camino secundario que el sonido debe recorrer antes de efectuar la cancelación activa.

- De las dos simulaciones realizadas a algoritmos adaptativos LMS y NLMS se observó que el desempeño de ambos es óptimo siempre que el cálculo del error, mediante el cual se van obteniendo los coeficientes del filtro en cada iteración, se realice en el dominio eléctrico, es decir, dentro del PC como parte de algún software de simulación. Al contrastar estos resultados con los obtenidos en el espacio tridimensional utilizando la funcionalidad y potencialidad del Cancelador Activo de Ruido, los resultados no son tan ideales como muestran dichas simulaciones. Todo esto es causado por los fenómenos físicos que ocurren cuando se intenta generar la resta acústica entre las señales de Ruido y Antisonido, tales como reflexión, interferencia destructiva y constructiva, dispersión, difracción causada por los límites del recinto cerrado, lo que genera un campo acústico modal o difuso según la frecuencia de dichos sonidos.
- La resta acústica entre la contaminación acústica y el antisonido es la clave de la cancelación activa de ruido y depende de factores como la precisión numérica del DSP que permita una correcta inversión de fase entre las 2 señales acústicas involucradas, de la posición del sensor y del actuador, y de la forma del espacio cerrado donde se intenta efectuar la atenuación sonora.
- Para obtener mejores resultados a los mostrados en materia de atenuación acústica se deben investigar nuevos algoritmos que permitan seguir con más eficacia la diferencia de fase entre el sonido que se intenta cancelar y el antisonido. Además se pueden agregar varios canales al Cancelador con el fin de distribuir el antisonido en una región cada vez más grande, sin olvidar la complejidad que esto le agrega a los algoritmos, debido a la aparición de mas caminos secundarios que serian el numero de sensores multiplicado por el numero de actuadores, y por ello la capacidad de

procesamiento de la plataforma tecnológica deberá ser muy alta para procesar tanta información en intervalos de tiempo tan cortos.

- La velocidad de procesamiento y precisión numérica del DSP son factores fundamentales para obtener convergencia y estabilidad en el desempeño del Cancelador
- Modificar arquitectónicamente espacios cerrados permite en muchos casos alterar los caminos acústicos que las perturbaciones sonoras recorren y así generar zonas de atenuación y zonas de refuerzo, tal como se logra mediante la cancelación activa, solo que es necesario el uso de materiales con altos índices de reflexión en unos casos y de absorción en otros. Sin embargo para frecuencias menores a 500Hz las ondas sonoras se difractan y bordean obstáculos haciendo que dichas modificaciones sean insuficientes para lograr la zona de silencio buscada.
- La selección del algoritmo FXLMS Feedback se basó en 2 premisas: el número de entradas y salidas analógicas con los que se disponía en el kit de desarrollo TMS320VC6711 con el que se disponía para realizar el experimento y la máxima atenuación obtenida, que en el caso de los algoritmos LMS y NLMS fue de solo 5[dB] mientras que para el caso del algoritmo seleccionado se lograron atenuaciones de hasta 25[dB].
- La forma del frente de onda de la señal de antisonido puede alterarse al utilizar varios parlantes canceladores ubicados en ciertas posiciones. Así que conociendo previamente la forma del frente de onda de la señal de contaminación auditiva que se intenta cancelar, se pueden aprovechar las ventajas de un Cancelador Activo de Ruido Multicanal para que la sumatoria de las señales de antisonido distribuidas espacialmente, formen aproximadamente el mismo frente de onda a cancelar y así se incremente la coherencia de ambas perturbaciones, incrementando la atenuación sonora del sistema.
- El tamaño de la fuente generadora de la perturbación sonora y el tamaño de los parlantes canceladores son directamente proporcionales a la forma del frente de onda que generan. Así una pequeña fuente que pueda ser tratada como puntual generará frentes de onda esféricos, mientras que grandes mecanismos vibratorios

generarán en muchos casos ondas planas o cilíndricas, todo dependiendo de la sección geométrica que haya causado la perturbación sonora. De este modo se concluye que para aumentar la coherencia entre los frentes de onda, estos deben ser similares entre sí, de modo que modificar las formas y tamaños de los parlantes involucrados en el proceso de cancelación activa de ruido puede resultar una estrategia para aumentar los niveles de atenuación acústica.

- La cancelación activa de ruido resuelve un problema que la cancelación pasiva de ruido aun no ha podido. Las frecuencias bajas son mucho más penetrantes que las de alta frecuencia y las barreras sonoras que funcionan muy bien para frecuencias de 500Hz en adelante no son eficaces para frecuencias menores. Sin embargo el desarrollo de un Cancelador activo eficiente para toda la banda es función de la capacidad de procesamiento del DSP, de la selección del algoritmo más eficiente para lograr cancelación, de la ubicación de los sensores o actuadores, de la geometría del recinto cerrado donde se busca la zona de silencio dada la posible respuesta modal o difusa del campo acústico generado.

BIBLIOGRAFIA

- 1] Theory and Design of Adaptive Filters, Jhon Treichler, C. Richard Johnson, JR. Michael C. Larimore
- 2] Active Noise Control Primer, Scott D. Snyder.
University of Adelaide. Australia
- 3] Active Noise Control Systems, Algorithms and DSP implementations, Sen M. Kuo, Northern Illinois University, Dennis R. Morgan, AT&T Bell Laboratories
- 4] <http://server.oersted.dtu.dk/> (información sobre programación de la plataforma DSK teaching kit TMS320VC6711 de Texas Instruments)
- 5] Design of a quite confort headboard, Sen M. Kuo, Senior Member, IEEE, and Ravi Kishore Yenduri, Student Member IEEE

ARTICULOS:

- K.C., Zangi
A NEW TWO SENSOR ACTIVE NOISE CANCELLATION ALGORITHM

IEEE 1993
- Zeng-Guang how, Yuancan Huang, Ying-Qinq Han
ACTIVE NOISE CANCELLATION WITH A NONLINEAR CONTROL MECHANISM

IEEE 1998
- Marc Bodson, Jonathan S. Jensen, and Scott C. Douglas
ACTIVE NOISE CONTROL FOR PERIODIC DISTURBANCES

IEEE 2001

- Biging Wu , Marc Bodson
MULTI CHANEL ACTIVE NOISE CONTROL FOR PERIODIC DISTURBANCES

IEE1999

- Marc Bodson, Jonathan S. Jensen & Scout C. Douglas
MULTI CHANEL ACTIVE NOISE CONTROL FOR PERIODIC DISTURBANCES

IEEE 1998

- Martin Bouchard, Bruno Paillard, and Chon Tan Le Dinh
IMPROVED TRAINING OF NEURAL NETWORKS FOR THE
NONLINEAR ACTIVE CONTROL OF SOUND AND VIBRATION

IEEE 1999

ANEXOS

- Anexo A: Disponible en el CD que se entregó con el actual libro

Espectros de las señales antes y después del procesamiento mediante el Cancelador Activo de Ruido.

Señales capturadas desde el micrófono de medición de decibeles con una duración de 10 segundos, grabadas con el fin de realizar los cálculos de valor RMS antes y después de la cancelación.

- Anexo B: Disponible en el CD que se entregó con el actual libro

3 carpetas con códigos de programas para tarjeta DSK Teaching Kit TMS320VC6711

1) FXLMS

2) LMS

3) Calculo_Camino_Secundario

En cada una de las carpetas listadas arriba se encuentran todos los archivos necesarios para montar los proyectos en Code Composer Studio Versión 2.10.0

- Anexo C: Disponible en el CD que se entregó con el actual libro

1 (un) Artículo sobre el algoritmo lms, describiendo aspectos matemáticos básicos del mismo realizado como parte de apoyo a este libro.