

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO
2. **TÍTULO:** DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO, PARA EL AIRE ACONDICIONADO EN LA CABINA DE UN VEHÍCULO
3. **AUTORES:** Marcel González Rodríguez, Manuel Fernando Anzola Rojas
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C.
5. **FECHA:** Noviembre de 2011
6. **PALABRAS CLAVES:** Control activo de ruido, sistema de ventilación (HVAC), aire acondicionado, filtros adaptativos, algoritmos adaptativos, procesamiento digital de señales (DSP), filtros digitales, respuesta al impulso, función de transferencia, camino primario, camino secundario.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un sistema de control activo de ruido, para reducir el ruido producido por un sistema de aire acondicionado en un vehículo estándar. Para esto se analizan diferentes estrategias y métodos de control y se realizan pruebas de campo con algoritmos fijos y adaptativos programados en un procesador digital de señales. Se presenta detalladamente todos los aspectos ingenieriles del diseño, incluyendo códigos de programación, simulaciones y resultados obtenidos.
8. **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Línea de investigación de la USB: Tecnologías actuales y sociedad. Línea de investigación facultad de ingeniería: Análisis y procesamiento de señales. Núcleo problemático: Acústica y audio, análisis y procesamiento de señales.
9. **FUENTES CONSULTADAS:** COBO PARRA, Pedro, Control Activo del Ruido, Unigraf, 1997. HANSEN, Colin, Understanding Active Noise Cancellation, Taylor & Francis, 2003. COTANA, Franco; ROSSI, Federico y BURATTI, Cinzia, Active Noise Control Technique for Diesel Train Locomotor Exhaust Noise Abatement. 144avo congreso de la Sociedad Americana de Acustica (ASA). HASHIMOTO, Hiroyuki; KAKUHARI, Isao, Active Control System for Low Frequency Road Noise Combined with an Audio System. Audio Engineering Society (AES), 2001. SCHIRMACHER, Rolf, Active Design of Automotive Engine Sound, Audio Engineering Society (AES), 2002.
10. **CONTENIDOS:** En el campo de la ingeniería, el control de ruido cumple un papel muy importante para mejorar las condiciones de vida de las personas, teniendo en cuenta que el ambiente sonoro al cual están expuestas afecta su salud e influye en su desempeño laboral y cotidiano. Existen dos métodos utilizados en el control de ruido; control pasivo y control activo. Este último método surge como una técnica complementaria al control pasivo de ruido. Su tamaño y peso considerablemente menor constituyen las principales ventajas que lo hacen adecuado para ser utilizado al interior del automóvil. Al analizar la cabina de un vehículo y asumir su comportamiento como una sala, se obtiene la respuesta al impulso de la misma, haciendo posible deducir las características del ruido proveniente del sistema de aire acondicionado. Conociendo el tipo de ruido a tratar, se diseña un sistema CAR buscando atenuarlo y reducir de esta manera los posibles perjuicios causados por la prolongada exposición al ruido.
11. **METODOLOGÍA:** Este proyecto se desarrolla mediante investigación experimental, puesto que para la cuantificación de los resultados se realizan previamente diferentes experimentos (simulaciones, mediciones) analizando el comportamiento de las variables involucradas.
12. **CONCLUSIONES:** En este proyecto se diseñaron, distintos sistemas de control activo, implementando algoritmos adaptativos y fijos, con el objetivo de controlar el ruido producido por el sistema de aire acondicionado al interior de un vehículo, logrando obtener reducciones en los niveles de ruido de hasta 4.6dB en el ancho de banda de funcionamiento deseado.

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO, PARA EL AIRE
ACONDICIONADO EN LA CABINA DE UN VEHÍCULO**

MARCEL GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
MANUEL FERNANDO ANZOLA ROJAS

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ D.C.

2011

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO, PARA EL AIRE
ACONDICIONADO EN LA CABINA DE UN VEHÍCULO**

MARCEL GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
MANUEL FERNANDO ANZOLA ROJAS

Proyecto de grado para optar por el título de: INGENIERO DE SONIDO

Tutor: Profesor Nelson Felipe Rosas Jiménez

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTÁ D.C.

2011

Notas de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 17 de Noviembre de 2011

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 ANTECEDENTES	17
1.1.1 Globales.....	17
1.1.2 Locales	19
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2.1 Pregunta problema.....	19
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.4.1 Objetivo general	20
1.4.2 Objetivos específicos.....	20
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	21
1.5.1 Alcances	21
1.5.2 Limitaciones	21
2. METODOLOGÍA	22
2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	22
2.2 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	22
2.3 HIPÓTESIS.....	22
2.4 VARIABLES	22
2.4.1 Variables independientes.....	22
2.4.2 Variables dependientes	22
2.5 MATERIALES	23
2.6 PROCEDIMIENTO	23
3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD/LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD/NÚCLEOS PROBLEMÁTICOS	25
3.1 NÚCLEO PROBLEMÁTICO.....	25
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA	25
3.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA.....	25
4. MARCO DE REFERENCIA	26
4.1 MARCO TEÓRICO- CONCEPTUAL.....	26

4.1.1 Control activo de ruido	26
4.1.2 Función de transferencia.....	32
4.1.3 Ruido en sistemas de ventilación.....	33
4.1.4 Sistemas de aire acondicionado en vehículos.	36
4.1.5 Sistema electrónico de control	38
4.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO	49
4.2.1 ISO 5128:1980. “Acoustics – Measurement of noise inside motor vehicles”	49
4.2.2 ISO 3382:2008. “Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms”	50
5. DESARROLLO INGENIERIL	52
5.1 ANÁLISIS DE LA FUENTE DE RUIDO	52
5.1.1 Determinación de la velocidad (RPM)	53
5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DE RUIDO	53
5.2.1 Determinación del ancho de banda	55
5.3 DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL ACTIVO.....	55
5.3.1 Tipo de ruido	56
5.3.2 Objetivos acústicos	56
5.3.3 Estrategia de control	56
5.3.4 Software	57
5.3.5 Hardware	58
5.3.6 Resumen método de control	58
5.4 ANÁLISIS FILTRO LIMITADOR.....	58
5.4.1 Diseño filtros	59
5.4.2 Filtro IIR Elíptico	59
5.4.3 Filtro IIR Butterworth.....	60
5.4.3 Filtro FIR Equiripple	61
5.4.4 Determinación filtro limitador del ancho de banda.....	63
5.5 ELECCIÓN DE LOS MATERIALES	63
5.6 DISEÑO SISTEMA CAR ADAPTATIVO MEDIANTE ALGORITMOS LMS.....	64
5.6.1 Estimación función de transferencia del camino secundario.....	65
5.6.2 Análisis del camino secundario	69

5.6.3 Simulación sistema CAR adaptativo	71
5.6.3.1 Medición señal de referencia y error	71
5.6.3.2 Medición retardos camino primario y secundario	74
5.6.3.3 Modelación en <i>Simulink</i>	75
5.6.3.4 Organización de pruebas	78
5.6.3.5 Resultados simulación	79
5.6.3.6 Resumen de resultados	84
5.7 IMPLEMENTACIÓN SISTEMA CAR ADAPTATIVO	85
5.7.1 Programación de algoritmos LMS y Fx-LMS	87
5.7.2 Evaluación del sistema	90
5.8 DISEÑO SISTEMA CAR FIJO MEDIANTE FILTRO DE WIENER.....	91
5.8.1 Diseño filtro Wiener	91
5.9 IMPLEMENTACIÓN SISTEMA CAR FIJO	92
5.9.1 Programación algoritmo fijo.....	93
5.9.2 Evaluación del sistema	93
5.10 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA CAR.....	94
5.9.2 Evaluación del sistema	96
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
6.1 VARIABLES DE LA FUENTE DE RUIDO	97
6.1.1 Velocidad del ventilador (RPM).....	97
6.1.2 Apertura de las rejillas	98
6.2 CARACTERIZACIÓN FUENTE DE RUIDO.....	99
6.2.1 Análisis en frecuencia de la señal de ruido	99
6.2.2 Análisis en tiempo de la señal de ruido	100
6.3 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	100
6.3.1 Sistema adaptativo.....	100
6.3.2 Sistema fijo.....	103
6.3.3 Comparación sistemas adaptativo y fijo	104
6.3.4 Sistema optimizado	104
6.3.5 Comparación sistema optimizado y sin optimizar	105

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
7.1 CONCLUSIONES	107
7.2 RECOMENDACIONES	108
8. BIBLIOGRAFÍA	110
GLOSARIO	112
ANEXO A	114
ANEXO B	115
ANEXO C	116
ANEXO D	117
ANEXO E	118
ANEXO F	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características en frecuencia y magnitud para el diseño de los filtros digitales.	59
Tabla 2. Componentes del sistema CAR modelado.	76
Tabla 3. Interruptores utilizados para variar los parámetros de configuración.	78
Tabla 4. Pruebas sistema CAR adaptativo modelado.	78
Tabla 5. Objetivos de las pruebas de simulación.	79
Tabla 6. Resultados globales del sistema CAR modelado y configuración del algoritmo adaptativo para las 9 pruebas realizadas.	84
Tabla 7. Características de los algoritmos adaptativos implementados en la tarjeta DSP.	87
Tabla 8. Configuración del bloque <i>LMS filter</i> para los 6 algoritmos programados.	90
Tabla 9. Características del algoritmo fijo implementado en la tarjeta DSP.	93
Tabla 10. Características algoritmos optimizados implementados en la tarjeta DSP.	96
Tabla 11. Nivel de ruido producido por el sistema de ventilación, según las diferentes velocidades de funcionamiento del ventilador (medido con las rejillas laterales totalmente cerradas).	97
Tabla 12. Nivel de ruido producido por el sistema de ventilación, según el estado de apertura de las rejillas laterales (medido con la velocidad 4 del ventilador).	98
Tabla 13. Atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 1, con los distintos algoritmos.	101
Tabla 14. Atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo. Por bandas de 1/3 de octava, en los 5 puntos escogidos, para el algoritmo Fx-LMS 450.	102
Tabla 15. Atenuación obtenida para el sistema CAR fijo. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 3. Utilizando el filtro Wiener.	103
Tabla 16. Atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo optimizado. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 3, con los distintos algoritmos.	105

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1. Espectro de la señal $x(t)$ obtenida para la velocidad 4, por bandas de octava normalizadas.	99
Grafica 2. Comparación Atenuación obtenida para el sistema adaptativo, utilizando el algoritmo Fx-LMS 450; y fijo, utilizando filtro Wiener. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 3.	104
Grafica 3. Comparación entre la atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo optimizado y sin optimizar, con el algoritmo Fx-LMS 450, (punto 3).	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a). Esquema del sistema activo propuesto por Olson y May (b).Curva de cancelación para varias separaciones micrófono altavoz	17
Figura 2. Diagrama espacial de cancelación de un transformador eléctrico, según Conover y Ringlee. Donde, Transformador (azul), transformados mas altavoz (rojo).	18
Figura 3. Esquema de un controlador <i>feedback</i> , donde e es la señal de error, y la señal de control y H la función de transferencia del filtro.	27
Figura 4. Esquema de un controlador <i>feedforward</i> , donde x es la señal de referencia, e la señal de error, y la señal de control y W la función de transferencia del filtro adaptativo.	27
Figura 5. Sistema de control activo de ruido en un vehículo, aplicado para el ruido de la carretera. Por medio de <i>feedforward</i>	32
Figura 6. Partes constitutivas y flujo de aire a través de un sistema de ventilación habitual.	33
Figura 7. Ventilador Axial.....	34
Figura 8. Circuito de refrigeración del aire acondicionado en vehículos.	36
Figura 9. Proceso de filtrado de una señal analógica y sus tres fases: conversión analógica-digital, procesamiento de filtrado digital, conversión digital-analógica.	38
Figura 10. Esquema de principales filtros digitales, según su respuesta al impulso (finita o infinita) y métodos de diseño.	39
Figura 11. Respuesta en frecuencia de un filtro butterworth pasa-bajo.	40
Figura 12. Respuesta en frecuencia del filtro elíptico pasa-bajo.....	41
Figura 13. Respuesta en frecuencia del filtro <i>equiripple</i> pasa-bajo.	41
Figura 14. Diagrama del filtro Wiener.....	42
Figura 15. Esquema de un filtro adaptativo donde; $d(k)$ señal deseada, $x(k)$ señal de referencia, $e(k)$ señal de error, $y(k)$ señal de control y $w(k)$ función de transferencia del filtro.	43

Figura 16. Metodología para la estimación de la respuesta al impulso del camino de cancelación, <i>On-line</i>	46
Figura 17. Etapas para el desarrollo del proyecto.	52
Figura 18. Esquema del método de medición utilizado para capturar y almacenar la señal de salida del sistema $y(t)$	54
Figura 19. (a) Proceso de convolución de un sistema, donde $x(t)$ es la señal anecoica, $h(t)$ es la respuesta al impulso, $y(t)$ es la salida del sistema. (b) Proceso de de-convolución aplicado para la obtención de $x(t)$	54
Figura 20. Esquema del método de control activo de ruido.	58
Figura 21. Respuesta en frecuencia del filtro elíptico.	60
Figura 22. Respuesta en fase del filtro elíptico.	60
Figura 23. Retardo de grupo del filtro elíptico.	60
Figura 24. Respuesta en frecuencia del filtro Butterworth.	61
Figura 25. Respuesta en fase del filtro Butterworth.	61
Figura 26. Retardo de grupo del filtro Butterworth.	61
Figura 27. Respuesta en frecuencia del filtro Equiripple.	62
Figura 28. Respuesta en fase del filtro Equiripple.	62
Figura 29. Retardo de grupo del filtro Equiripple.	62
Figura 30. Diagrama del sistema CAR adaptativo <i>feedforward</i> , donde $x(t)$ señal de referencia, $e(t)$ señal de error, $y(t)$ señal de control y C , función de transferencia estimada del camino secundario.	65
Figura 31. Esquema para la identificación del camino secundario, donde SP representa el camino secundario real y Coeffs_S, los coeficientes utilizados para la estimación de este.	66
Figura 32. Identificación del camino secundario mediante el filtro adaptativo LMS normalizado para (a) 90 coeficientes. (b) 270 coeficientes. (c) 450 coeficientes. (d) 750 coeficientes.	66

Figura 33. Filtro limitador de ancho de banda (50 – 230 Hz), para una frecuencia de muestreo de 8000 Hz. Orden= 675.....	68
Figura 34. Identificación del camino secundario utilizando filtro limitador de ancho de banda, para (a) 750 coeficientes. (b) 350 coeficientes.	68
Figura 35. Respuesta al impulso del camino secundario: real (azul), estimada (verde), error de estimación (rojo).	69
Figura 36. (a) Respuesta en frecuencia del camino secundario estimado con 750 coeficientes, sin limitación del ancho de banda. (b) Primera resonancia (80 Hz). (c) Segunda resonancia (135 Hz)..	70
Figura 37. Ubicación micrófono de referencia y error en la cabina.	72
Figura 38. Gráfico de amplitud Vs. tiempo: Señal de referencia (Gráfica superior), señal de error (Gráfica inferior).	73
Figura 39. Análisis en frecuencia: (a) Señal de referencia, (b) señal de error.	73
Figura 40. Retardo temporal entre el micrófono de referencia (gráfica superior) y el micrófono de error (gráfica inferior).	74
Figura 41. Retardo temporal entre el micrófono sucesivo a la fuente secundaria (gráfica superior) y el micrófono de error (gráfica inferior).	74
Figura 42. Sistema CAR modelado en <i>Simulink</i>	77
Figura 43. Respuesta del sistema CAR modelado para un tono puro de 100 Hz, (a) Sin función de transferencia del camino secundario. (b) Con retardo del camino secundario (2 ms). (c) Con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).....	80
Figura 44. Respuesta del sistema CAR modelado para señales de ruido A/C, (a) Sin función de transferencia del camino secundario. (b) Con retardo del camino secundario (2 ms). (c) Con función de transferencia del camino secundario estimada (450 coeficientes). (d) Con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).	81
Figura 45. Respuesta del sistema CAR modelado para señales de ruido A/C con limitación del ancho de banda, (a) Con retardo del camino secundario (2 ms). (b) Con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).	83
Figura 46. Implementación del sistema CAR.	85

Figura 47. Flujo de señal del sistema CAR adaptativo implementado al interior del vehículo. Las líneas rojas representan los caminos acústicos: primario (FP) y secundario (SP).	87
Figura 48. Algoritmo LMS.....	88
Figura 49. Algoritmo Fx-LMS, con retardo del camino secundario (2ms).	88
Figura 50. Algoritmo Fx-LMS, con función de transferencia del camino secundario estimada (450 coeficientes).	88
Figura 51. Algoritmo Fx-LMS, con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).	89
Figura 52. Algoritmo Fx-LMS, con limitación de ancho de banda y retardo del camino secundario (2ms).	89
Figura 53. Algoritmo Fx-LMS, con limitación de ancho de banda y función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).	89
Figura 54. Puntos de medición en el espacio sonoro del conductor a una altura de 1.10 m. El punto 1 corresponde a la posición del micrófono de error.	90
Figura 55. Diagrama del sistema CAR fijo feedback, donde $e(t)$ señal de error, $y(t)$ señal de control, Coeffs_fixed coeficientes del filtro Wiener fijo y C , función de transferencia estimada del camino secundario.....	91
Figura 56. Sistema CAR adaptativo modelado en <i>Simulink</i> , para la obtención de los coeficientes del algoritmo adaptativo Fx-LMS 45.	92
Figura 57. Flujo de señal del sistema CAR fijo implementado al interior del vehículo. La línea roja representa el camino acústico secundario (SP).	93
Figura 58. Algoritmo fijo, con función de transferencia del camino secundario estimada (450 coeficientes) y filtro Wiener fijo de 1024 coeficientes.	94
Figura 59. Ubicación micrófono de error sistema optimizado.....	94
Figura 60. Identificación del camino secundario mediante el filtro adaptativo LMS normalizado para el sistema optimizado, con (a) 450 coeficientes. (b) 750 coeficientes.	95

Figura 61. Respuesta en frecuencia del camino secundario estimado con 750 coeficientes, sin limitación del ancho de banda.	95
Figura 62. Punto de medición del sistema CAR optimizado.	96
Figura 63. Respuesta temporal de la señal de ruido medida durante 30 segundos.	100

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería, el control de ruido cumple un papel muy importante para mejorar las condiciones de vida de las personas, teniendo en cuenta que el ambiente sonoro al cual están expuestas afecta su salud e influye en su desempeño laboral y cotidiano. Existen dos métodos utilizados en el control de ruido; para frecuencias superiores a 500 Hz se utiliza el control pasivo, en el cual las dimensiones de las barreras y resonadores son directamente proporcionales a la longitud de onda de la frecuencia que se desea controlar¹. Para frecuencias inferiores a 500 Hz se utiliza el control activo de ruido (CAR)².

El CAR esta basado en el principio de superposición de ondas. Si en una zona del espacio existe un campo acústico primario y se genera un campo acústico secundario, tal que:

$$Pp(x, y, z, t) + Ps(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

Donde Pp y Ps representan el campo primario y secundario respectivamente

Entonces ambos campos interferirán destructivamente, cancelándose mutuamente.

Este método surge como una técnica complementaria al control pasivo de ruido. Su tamaño y peso considerablemente menor constituyen las principales ventajas que lo hacen adecuado para el control de ruido al interior del automóvil.

Al analizar la cabina de un vehículo y asumir su comportamiento como una sala, se obtiene la respuesta al impulso de la misma, haciendo posible deducir las características del ruido proveniente del sistema de aire acondicionado. Conociendo el tipo de ruido a tratar, se diseña un sistema CAR buscando atenuarlo y reducir de esta manera los posibles perjuicios causados por la prolongada exposición al ruido.

¹ COBO, P; BRAVO, T; CUESTA, M; RANZ, C y SIGUERO, M. Control Activo del Ruido. En: digital.csic.es. Madrid: Instituto de Acústica CSIC. p.1.

² LA ROSA MACEDO, Daniel. Estudio y Simulación de Protectores Auditivos para la Atenuación del Ruido Generado por un Martillo Neumático Aplicando Control Activo de Ruido. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2008.

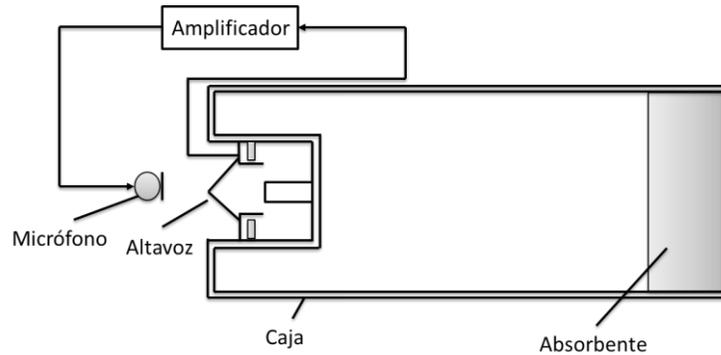
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

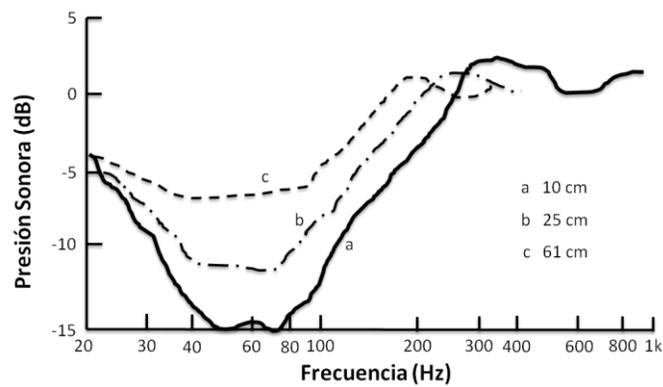
1.1.1 Globales

- El primero que pensó en las posibilidades de este principio para controlar el ruido fue Paul Lueg en 1933, un científico alemán que incluso patentó la idea en Alemania y Estados Unidos.
- Esta idea no pudo ser aplicada de manera práctica si no hasta los años 50. Cerca del año de 1953 Olson y May desarrollaron un sistema activo, por medio de *feedback*, aplicable a la reducción local de ruido.

Figura 1. (a). Esquema del sistema activo propuesto por Olson y May (b). Curva de cancelación para varias separaciones micrófono altavoz



(a)

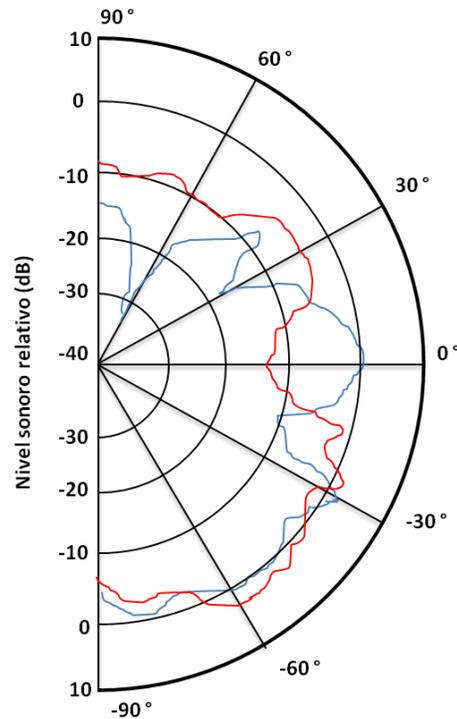


(b)

Fuente: Cobo Parra, 1997

- Por la misma época, Conover y Ringlee (1955) aplicaron métodos activos a la reducción del ruido periódico de los transformadores eléctricos. Por su carácter repetitivo, idearon un filtro analógico fijo para controlar los tres primeros armónicos (120, 240, 360 Hz).

Figura 2. Diagrama espacial de cancelación de un transformador eléctrico, según Conover y Ringlee. Donde, Transformador (azul), transformados mas altavoz (rojo).



Fuente: Cobo Parra, 1997

- A mitad de la década de los 70 aparece el importante artículo de Widrow et al. (1975) sobre principios y aplicaciones de la cancelación adaptativa del ruido.
- En los últimos años se elaboraron cascos para motocicleta los cuales cuentan con sistemas de control activo de ruido, mejorando las condiciones de bienestar del usuario. Control activo de ruido acústico en cascos de motociclismo. Autor: Sánchez, Ricardo S. 2007.
- Recientemente se han desarrollado numerosos estudios acerca de las técnicas de control activo de ruido, mostrando mejoras en la implementación del mismo, logrado resultados más eficientes al tratar ruidos de diferentes características. Desarrollo e Implementación de un Controlador activo de Ruido de Banda Angosta Adaptativo. Autor. F. A. González, R. Rossi, G. 2011

- En la actualidad, el control activo de ruido (CAR) ha avanzado hasta abarcar no solo en el objetivo de la completa cancelación de la señal sonora no deseada, para enfocarse en el diseño de sonido activo (ASD), que pretende cancelar el ruido no deseado e implementar, en cambio de éste, un sonido previamente diseñado.

1.1.2 Locales

- Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.
 - Control Activo para el Aislamiento del Ruido Producido por el Motor de los Carros, al Interior de estos. Autor: Patiño Cedeño, Lucas. 2008.
 - Diseño y Construcción de un Dispositivo que Permite Reducir el Ruido del Motor de un Carro en su Interior, A partir del Control Activo de Ruido. Autor: Cárdenas Patiño, William Andrés. 2010.
- Universidad de la Salle
 - Metodología de Control Activo de Ruido en Ductos. Autores: Enciso, William R. Murillo, Freddy A. 2009.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El sonido proveniente del viento, que circula en el sistema de aire acondicionado, es una de las principales componentes de ruido presentes en la cabina de un automóvil. Resulta dominante a altas velocidades de funcionamiento, sobresale del ruido de fondo por sus componentes tonales y, en consecuencia, interfiere con el confort y la comodidad deseada en un vehículo.

El ruido producido, por los sistemas de ventilación o aire acondicionado, será dependiente de la velocidad con la cual está funcionando el sistema, es decir, de la cantidad de RPM con la que gire el ventilador del mismo. Adicional a esto también dependerá de la cantidad de aspas, de su diámetro, de la cantidad de rejillas y de la apertura de estas.

Siendo el aire acondicionado un sistema de ductos y ventiladores, genera un ruido con características tonales y en baja frecuencia. Con una frecuencia de resonancia particular, esta frecuencia y sus armónicos serán controlados mediante sistemas de control activo de ruido (CAR), ya que según sus propiedades será idóneo para tratarse con estos métodos.

Una de las características principales de este tipo de ruido es su continuidad relativa en el tiempo, haciendo posible implementar un filtrado no adaptativo (Wiener), y compararlo con un filtrado adaptativo por medio del algoritmo LMS, por posibles variaciones que éste pueda presentar.

1.2.1 Pregunta problema

¿Es posible reducir el ruido emitido por el sistema de aire acondicionado de un vehículo a partir de la implementación del control activo de ruido, utilizando un filtro adaptativo que aplique el algoritmo LMS o mediante un filtro fijo Wiener?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El CAR surge como una técnica complementaria al control pasivo de ruido, el cual presenta como su principal ventaja la disminución en las dimensiones del sistema de control para bajas frecuencias³. Para casos en los cuales el espacio es una limitante en la implementación de los sistemas de control, como en automóviles, es óptimo utilizar el método de control activo, ya que minimiza el tamaño y peso de la solución⁴, sin aumentar el consumo de combustible, ni ocupar de forma importante el espacio destinado a los pasajeros. Algunos trabajos realizados en esta temática son: (Shirmacher, 2002). (Hashimoto, 2001). (Cotana et al). (Masgrau et al).

Según estudios realizados por la Organización mundial de la salud (OMS), se ha demostrado que el ruido en el tráfico (ruido en baja frecuencia, producido por fuentes como el motor, o aire acondicionado), es causa de altos niveles de estrés, ansiedad y agresión, entre otras cosas. Esto ocurre cuando el tiempo de exposición es superior a 3 horas diarias y el nivel de presión sonora (NPS), es mayor a 65 dB⁵.

Con el avance de la tecnología y el desarrollo de mejores placas DSP, se ha hecho posible implementar la teoría de superposición de campos sonoros, permitiendo el desarrollo de sistemas CAR eficaces para ruidos en bajas frecuencias y variables en el tiempo.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Reducir el ruido generado por el aire acondicionado en sus distintas velocidades, presente en el espacio sonoro del conductor de un vehículo, mediante la implementación de CAR.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la fuente de ruido y las diferentes variables que lo modifican, como (velocidad del ventilador, apertura de las rejillas).
- Realizar medición para caracterizar el tipo de ruido emitido por el aire acondicionado y sus frecuencias resonantes. Para limitar a un ancho de banda específico.
- Determinar desde qué velocidad (rpm) es conveniente y útil activar el sistema.
- Buscar el método de control activo más adecuado a las necesidades requeridas. Implementando dos métodos de filtrado (Wiener fijo y LMS adaptativo).

³ Ibid.

⁴ COBO; BRAVO; CUESTA; RANZ y SIGUERO. Op. cit., p. 1.

⁵ GARCÍA OCHOA, Sonia. Ruido en el Tráfico es Causa de Estrés, Ansiedad, Agresión e Irritabilidad. En: <http://www.oem.com.mx/laprensa/>. México: Organización Editorial Mexicana, 2010.

- Diseñar un sistema CAR para atenuar este ruido, en el espacio sonoro del conductor. Para un automóvil tipo sedan de gama media, considerando un igual comportamiento en cada una de las fuentes presentes.
- Implementar el diseño.
- Comparar la reducción de ambos filtros utilizados, determinando su eficiencia.
- Optimizar el sistema según los resultados obtenidos.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances

- Lograr un mayor confort y comodidad en vehículos. Reduciendo una de las componentes más molestas de ruido.
- Reducir el estrés producido por exposiciones prolongadas a ruidos en baja frecuencia.
- Implementar el uso de control activo, para el ruido del aire acondicionado en la industria automotriz, ya que el sistema CAR ha sido utilizado en automóviles, únicamente para controlar el ruido del motor o de la fricción entre las llantas y el pavimento.

1.5.2 Limitaciones

- Incertidumbre de los equipos de medición disponibles.
- Incertidumbre en los métodos de medición.

2. METODOLOGÍA

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se desarrolla mediante investigación experimental, puesto que para la cuantificación de los resultados se realizan previamente diferentes experimentos (simulaciones, mediciones) analizando el comportamiento de las variables involucradas, como lo es el ruido producido por el sistema de aire acondicionado o la velocidad de revoluciones por minuto del ventilador, entre otras.

2.2 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información necesaria para determinar el grado de eficiencia de este proyecto es adquirida mediante mediciones realizadas bajo normativa ISO, teniendo como variables el nivel de ruido presente en la cabina del vehículo y el ruido proveniente del sistema de aire acondicionado; este último varía de acuerdo a la velocidad de giro del ventilador, la cantidad de rejillas presentes y el estado de apertura de estas.

2.3 HIPÓTESIS

El control activo de ruido mediante filtrado fijo (Wiener) o adaptativo (LMS) aplicado para sistemas de aire acondicionado en vehículos, resulta eficaz en el espacio sonoro del conductor.

2.4 VARIABLES

2.4.1 Variables independientes

- Calibración del sistema de aire acondicionado del vehículo implementado.
- Tipo de ruido producido por el ventilador.
- Ancho de banda del ruido a controlar.

2.4.2 Variables dependientes

- Velocidad de funcionamiento del sistema de aire acondicionado.
- Cantidad de rejillas presentes en la cabina del vehículo.
- Flujo de aire saliente por cada una de las rejillas presentes en la cabina de acuerdo a su apertura.

2.5 MATERIALES

- Sonómetro: SVAN 943A, Svantek.
- Software: Adobe Audition, plug-in Aurora, MATLAB.
- Micrófonos de medición y señal de error: ECM8000, Behringer.
- Micrófono señal de referencia: Shotgun AT8015, Audio-Technica.
- Interfaz de audio: Fast Track Ultra, M- Audio.
- Fuente: Home theater- subwoofer y amplificador, Inspire GD580, Creative.
- Tarjeta DSP: TMS320C6713, Texas Instruments.
- Computador: VAIO VCP127FX, Sony.
- Vehículo: Ford Laser 2001, sedan.

2.6 PROCEDIMIENTO

- Analizar la fuente de ruido para poder determinar las diferentes componentes que esta pueda presentar, tales como la frecuencia propia del sistema y sus respectivos armónicos. Para esto, se mide la respuesta al impulso de la sala (cabina del vehículo), mediante la norma ISO3382⁶. Al tener estos datos se mide el ruido proveniente del aire acondicionado, en el espacio sonoro del conductor. Mediante de-convolucion de la señal de salida $y(t)$ y la respuesta al impulso $h(t)$, se obtiene la señal de entrada al sistema $x(t)$, esta representa la fuente de ruido entrante al sistema, libre de reflexiones.
- Lo anterior se realiza para las diferentes velocidades de funcionamiento del sistema de aire acondicionado, logrando así determinar la variación en nivel de presión sonora (NPS) y frecuencia, según (RPM). Considerando que a menor cantidad de revoluciones se presenta un menor NPS y una frecuencia característica más baja, sugiere que el ruido podrá no ser molesto a velocidades bajas.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por los pasos anteriores y al haber caracterizado la fuente de ruido, es posible seleccionar un método adecuado de control activo de ruido.
- Diseñar el sistema CAR para conseguir atenuación en el espacio sonoro del conductor (control local), según el NPS y ancho de banda del ruido, se escogerá entre métodos

⁶ INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARIZATION. ISO3382-2:2008 Acoustic- Measurement of room acoustic parameters- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=36201, 2008.

feedback y *feedforward*, así como la instrumentación necesaria (micrófonos, altavoces). Por otra parte se implementa un filtrado digital de señal en tarjeta DSP.

- Se Implementan dos métodos de filtrado digital (Wiener fijo, LMS adaptativo). Estos presentan características de funcionamiento diferentes, siendo el primero un filtro estático en el tiempo y el segundo, capaz de adaptarse a las variaciones de la señal entrante. Para evaluar su efectividad en este caso.
- Implementar el sistema en un automóvil Ford Laser modelo 2001, Tipo sedan. Para las 4 fuentes (rejillas).
- Medir el nivel de ruido presente en la cabina con el sistema CAR activado, utilizando el sonómetro SVAN943 tipo 2, por bandas de 1/3 de octava, en ponderación lineal. Considerando un ruido de fondo igual al medido anteriormente.
- Comparar los niveles de obtenidos con el sistema CAR activado y desactivado. Para sus respectivas velocidades de funcionamiento y tipo de filtro. Para encontrar el filtro más eficiente.

3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD/LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD/NÚCLEOS PROBLEMÁTICOS

3.1 NÚCLEO PROBLEMÁTICO

Acústica y audio, Análisis y procesamiento de señales: Este proyecto hace parte del núcleo problemático debido a que trata directamente problemas relacionados con la acústica, como el aumento del confort en la cabina de un vehículo, por medio de la atenuación del ruido generado por el sistema de aire acondicionado, mediante el procesamiento digital de señales (DSP) implementado en un sistema de control activo de ruido (CAR).

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis y procesamiento de señales (APS): Este proyecto hace parte de la línea de investigación antes mencionada ya que, para un control activo de ruido (CAR), se hace necesario realizar el análisis de la fuente de ruido para posteriormente procesar digitalmente la señal, en la implementación del sistema.

3.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

Tecnologías actuales y sociedad: Este proyecto hace parte de la línea de tecnologías actuales ya que desarrolla un dispositivo electrónico para el campo del control de ruido, basándose en tecnología actual como placas DSP. Además permitirá un beneficio social al generar confort a los usuarios de vehículos que implementen el dispositivo.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEÓRICO- CONCEPTUAL

4.1.1 Control activo de ruido

En esta sección se presentan los principales conceptos del control activo.

4.1.1.1 Introducción al control activo de ruido

El concepto de control activo de ruido (CAR) resulta ser antiguo en el campo de la acústica. Consiste en la adición de una o más fuentes de sonido ubicadas en el área a controlar. Estas irradian energía acústica coherentemente con el ruido primario, con el objetivo de que se sumen en el medio elástico produciendo un menor ruido residual. La tarea de un sistema de control activo es reproducir el sonido primario en contra fase en toda el área de interés, siempre a tiempo. Para lograr esto, la señal de ruido primario es capturada, procesada (digital o análogamente), y reproducida (generando el ruido secundario), con el objetivo de realizar una interferencia destructiva de las señales, produciendo así la atenuación⁷.

Para conseguir la precisión necesaria se requiere de ciclos cerrados controlados. Típicamente el sistema usa micrófonos de monitoreo para medir el ruido residual y filtros digitales adaptativos para calcular la señal de salida hacia el altavoz.

4.1.1.2 Sistemas de control

Las variables que definen un sistema (CAR) son dependientes de:

Objetivos Acústicos:

- Interferencia o absorción
- Control local o global
- Número y situación de fuentes secundarias
- Extrapolación del campo

Tipos de ruido:

- Banda Estrecha o ancha
- Medio de propagación (tubos, recintos)
- Ruido aéreo o estructural
- Variabilidad temporal (periódico, estacionario)

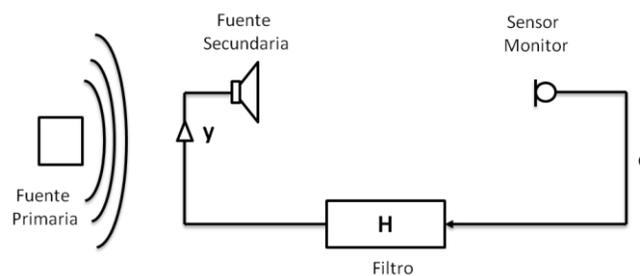
⁷ SCHIRMACHER, Rolf. Active Design of Automotive Engine Sound. En: Audio Engineering Society (AES) E-Library. www.aes.org/e-lib/. Munich: Müller-BBM GmbH, Planegg, 2002.

Estrategias de control:

- *Feedback*

El campo medido por un micrófono monitor es realimentado a un altavoz secundario a través de un filtro eléctrico para generar el campo secundario, este campo es extrapolado hasta la posición del monitor como un campo secundario (y) que interacciona con el campo primario (x). El esquema se muestra en la figura 3.

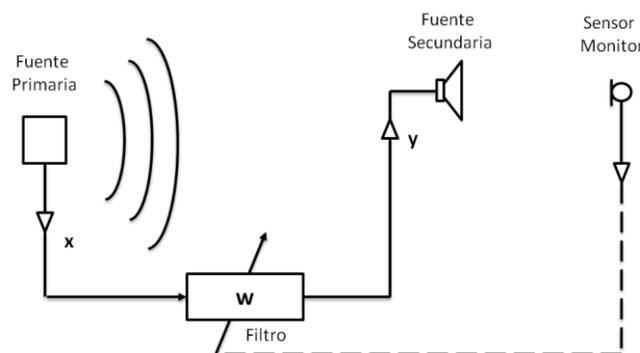
Figura 3. Esquema de un controlador *feedback*, donde e es la señal de error; y , la señal de control y H , la función de transferencia del filtro.



- *Feedforward*

En este tipo de control, se usa un sensor de referencia para detectar el campo primario en alguna posición anterior al micrófono monitor. Esta señal de referencia de entrada al controlador es especialmente útil en ruido aleatorio de banda ancha. Si el ruido es periódico, tal como el de maquinaria rotatoria, la señal de referencia puede ser detectada por otro sensor distinto a un micrófono; (acelerómetro) lo cual tendría ventajas ya que el detector no será afectado por el campo secundario. Esto es un problema usual en los sistemas *feedforward* pues el micrófono de referencia captura además del campo primario el campo secundario. El esquema se muestra en la figura 4.

Figura 4. Esquema de un controlador *feedforward*, donde x es la señal de referencia; e , la señal de error; y , la señal de control y W , la función de transferencia del filtro adaptativo.



4.1.1.3 Principios para un control eficaz

- El éxito de la cancelación activa del ruido radica en la correcta interconexión de la parte acústica con la parte electrónica, ya que el retardo acústico entre la zona de medida y la zona de cancelación ha de ser suficiente. La posición y el número de micrófonos y altavoces es crucial.
- El campo medido en la posición de los micrófonos ha de ser extrapolado a la posición de cancelación.
- El diseño de este operador encargado de la extrapolación ha de estar basado en la ecuación de onda. Por consiguiente depende críticamente de las condiciones del contorno (geometría) del problema.
- En geometrías sencillas, es posible diseñar un operador de extrapolación que funcione en un margen amplio de frecuencias y en una zona extensa del espacio. En estas situaciones conviene acometer un control global. Principio acústico: Interferencia Destructiva.
- En otras geometrías el campo es tan complejo que conviene plantearse una estrategia de control local. Principio acústico:
 - Absorción Activa (se hace vibrar el diafragma de la fuente secundaria en contrafase con el campo primario). El control local permite generar zonas de silencio alrededor de $1/10$ de la longitud de onda.
- Tanto en control local como global, la cancelación es más efectiva cuanto más próxima esté la fuente primaria a la secundaria con relación a la longitud de onda. Esto hace que el control activo sólo sea efectivo en el margen de bajas frecuencias.
- La efectividad también aumenta con el número de fuentes secundarias. Es necesario construir correctamente las fuentes secundarias en función de las características direccionales del campo primario, será necesario disponer fuentes mono-polares, dipolares, o en general multi-polares.
- El sistema CAR a diseñar depende también del tipo de ruido a controlar. Se distingue fundamentalmente entre ruidos de banda estrecha y ancha. Si el ruido de banda estrecha es además periódico, el diseño del sistema car se simplifica considerablemente, sobre todo si el número de armónicos es bajo. Además de las características espectrales del ruido, hay que considerar su variabilidad temporal. Si las características del ruido varían con el

tiempo, como suele ser el caso, el controlador tendrá que ser capaz de adaptarse a esos cambios (adaptativo).

- En términos generales se puede decir que la configuración *feedback* es más apropiada para control local, mientras que la estructura *feedforward* es más usada en control global.
- Debido al enorme desarrollo de las técnicas de procesamiento digital de señal (DSP) y su implementación en placas potentes y rápidas hace que esta solución sea mucho más atractiva en comparación con el filtrado analógico. Estas placas pueden ser controladas por software, lo que permite un diseño de un sistema CAR asistido por computador. Las tarjetas se pueden actualizar para acomodarse a nuevos problemas y situaciones. Además como son instrumentos virtuales se puede incorporar cualquier nuevo algoritmo que optimice la solución.⁸

4.1.1.4 Control Activo en Recintos

Modos Normales en un Recinto Rectangular

El campo sonoro en el interior de un recinto depende de la geometría del mismo, de las condiciones del contorno, de las paredes, de las in-homogeneidades del medio y además, de la posición y número de fuentes en el mismo. Un modo normal de vibración de cualquier sistema vibratorio es una frecuencia con la cual el sistema puede oscilar durante algún tiempo después de interrumpida toda excitación.

La ecuación para los modos normales dentro de un recinto es la siguiente:

$$fn = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{nx}{Lx}\right)^2 + \left(\frac{ny}{Ly}\right)^2 + \left(\frac{nz}{Lz}\right)^2} \quad (2)$$

Donde Lx , Ly , Lz son dimensiones del recinto, nx , ny , nz , Son enteros naturales y determinan el modo de vibración en el que se está haciendo el cálculo, c es la velocidad del sonido en el aire dada en (m/s) y fn es la frecuencia de resonancia.

Existen tres tipos de modos en un recinto:

Modos Axiales: Son los que tienen su propagación en dirección de alguno de los ejes, se obtienen cuando un par de números de la terna (nx, ny, nz) son cero.

Modos Tangenciales: Estos tienen la propagación en un plano paralelo a una de las superficies del recinto, se obtienen cuando un número de la terna (nx, ny, nz) es cero.

⁸ COBO PARRA, Pedro. Fundamentos del Control Activo del Ruido. En: Control Activo del Ruido. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid: Unigraf, 1997. p. 74-109.

Modos Oblicuos: Son los que se propagan oblicuos a todas las superficies del recinto, ninguno de los números de la terna (n_x, n_y, n_z) es cero⁹.

Control Activo Global

El primer paso para afrontar una estrategia de control global en un recinto es definir una función de coste adecuada, algunos métodos usan la energía potencial acústica total, la cual es proporcional a la suma de los cuadrados de las amplitudes de los modos medidos en cada una de las posiciones del recinto. La energía acústica potencial es proporcional a la potencia acústica neta en el recinto, por lo que minimizar la primera equivale a reducir la segunda. Es necesario usar un número de micrófonos suficiente como para medir todos los modos dominantes en la banda de frecuencias de interés así mismo se hace necesario excitar todos estos modos relevantes. En 1993 Elliot y Nelson obtuvieron mejores resultados usando el doble de micrófonos de referencia que fuentes secundarias.

Se considera un sistema activo compuesto de K micrófonos de referencia y M fuentes secundarias con $K > M$. Sean $X_k(n)$ e $y_m(n)$ las señales de referencia y las señales secundarias, respectivamente con $K=1,2,\dots,M$. Si las señales de referencia y secundarias están interconectadas linealmente a través de los filtros, entonces:

$$y_m = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{l-1} w_{mk}(i) x_k(n-i). \quad (3)$$

De acuerdo con Nelson y Elliot el éxito de un control activo global es dependiente de una serie de factores, entre ellos:

- Las señales de referencia excitan persistentemente los filtros de control, de modo que se evitan posibles inestabilidades de los filtros.
- La precisión de las medidas de los modelos de vías secundarias.
- La velocidad de adaptación de los coeficientes de los filtros de control¹⁰.

Control Activo Local

El éxito de la aproximación global se fundamenta en la simplicidad del campo acústico en el recinto en baja frecuencia, debido al pequeño número de modos excitados en este margen, el número de modos y la densidad modal se incrementan con el cubo y con el cuadrado de la frecuencia, respectivamente. Por tanto, a medida que crece la frecuencia, la densidad modal es mayor, el campo

⁹ COBO PARRA, Pedro. Control Activo en Recintos. En: Control Activo del Ruido. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid: Unigraf, 1997. p. 147-175.

¹⁰ *Ibid.*, p. 147-175.

acústico en el recinto es más complejo, y el número de fuentes secundarias necesarias es tan grande que el control global es inviable¹¹.

Adicionalmente, el control local es dependiente en gran medida de la ubicación del micrófono monitor, pues una “zona de silencio” de un radio aproximado a 1/10 de la longitud de onda se genera alrededor de este¹². Por lo tanto, conforme la frecuencia aumenta, la zona de atenuación se vera reducida. La frecuencia máxima para la que es posible conseguir una zona de atenuación de radio d , esta dada por la siguiente ecuación:

$$F \text{ max.} = \frac{c}{10 * d} \quad (4)$$

Donde; c, velocidad del sonido en el aire y d, radio de la zona de atenuación.

Por esto, se puede concluir que resulta mucho mejor hacer un control local ya que de esta manera se tiene una mejor predicción del comportamiento del sonido, debido a que la función de transferencia será de menor complejidad, por lo que se hace más sencilla la programación de filtros eficientes.

4.1.1.5 Control activo de ruido en automóviles

En los años recientes, se ha incrementado el énfasis en la reducción del peso en los vehículos, con el objetivo de lograr un menor gasto de combustible. Por otro lado, es incómodo para los pasajeros escuchar el sonido del sistema de audio debido a los distintos ruidos entrantes a la cabina del vehículo. A la vez, las medidas convencionales para reducir el ruido en automóviles causan incremento en su peso. La tecnología de control activo de ruido tiene el potencial de resolver este problema contradictorio, y muchas investigaciones para aplicar CAR en automóviles están tomando lugar.

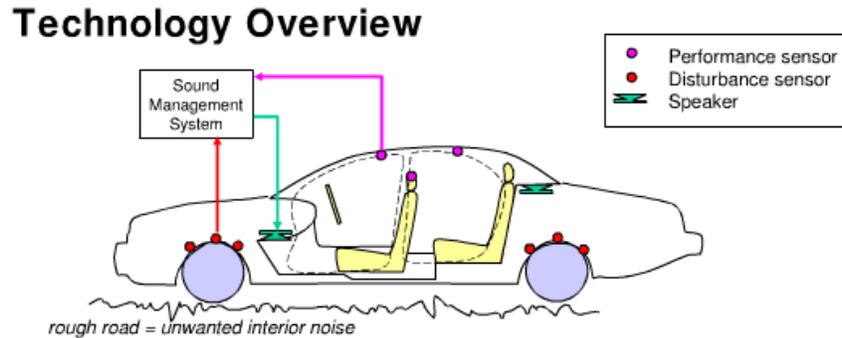
El CAR ha sido aplicado efectivamente en vehículos, para controlar el ruido periódico producido por el motor, en la cabina, silenciadores y ductos de admisión. Al igual que para controlar el ruido aleatorio generado por el contacto de las rueda con el pavimento.

El control activo de ruido en automóviles se hace necesario debido al alto ruido de fondo que afecta las comunicaciones, el sistema de entretenimiento, la percepción de calidad y causa fatiga al conductor. Los métodos pasivos están alcanzando su límite debido a consideraciones de peso, dimensiones reducidas y dificultades en los diseños. Un sistema CAR incorporado con los sistemas de amplificación de audio, parlantes, cables y conectores del vehículo, además de un uso compartido de los transductores de error y sensores permitirá reducir su costo.

¹¹ Ibid., p. 147-175.

¹² HANSEN, Colin. Foundations of Active Control. En: Understanding Active Noise Cancellation. Taylor & Francis e-Library, 2003. p. 26.

Figura 5. Sistema de control activo de ruido en un vehículo, aplicado para el ruido de la carretera. Por medio de *feedforward*.



Fuente: Park et al, 2004.

Un sistema de control de sonido, suplementa el sonido pasivo, para un mejor control del la respuesta acústica interior, mas allá de las limitaciones de diseños pasivos. Además el dominio del sistema puede ser redistribuido a través del vehículo, permitiendo modificar características de la respuesta que de otra manera sería muy difícil modificar a través de sistemas pasivos.¹³

4.1.2 Función de transferencia

En los modelos de función de transferencia, el objetivo es relacionar dos series temporales elaborando modelos causales de predicción. Se considera la forma de relacionar una serie temporal, denominada $y(t)$ en función de otra serie temporal denominada $x(t)$, también se considera a priori que existe una causalidad unidireccional desde $x(t)$ hacia $y(t)$ ignorando la posibilidad de una retroalimentación.

El modelo más sencillo de función de transferencia es el de una sola señal de entrada $x(t)$ la cual tiene una sola señal de salida $y(t)$, que se pueden relacionar en un filtro de la siguiente manera:

$$Y_t = v_0X_t + v_1X_{t-1} + v_2X_{t-2} + \dots + N_t \quad (5)$$

$$Y_t = v_0(B)X_t + N_t \quad (6)$$

Donde $v(B) = v_0 + v_1B + v_2B^2$ y N_t es el ruido del sistema que es independiente de la entrada $x(t)$, los coeficientes de $v(B)$ se conocen con la respuesta al impulso. Para que el sistema sea estable se debe cumplir con lo siguiente: que una variación finita en la entrada $x(t)$, produzca una variación finita también en la salida $y(t)$. Esto deberá cumplirse de acuerdo a la siguiente ecuación:

¹³ HASHIMOTO, Hiroyuki. KAKUHARI, Isao. Active Control System for Low Frequency Road Noise Combined with an Audio System. En: Audio Engineering Society (AES) E- Library. www.aes.org/e-lib/. 2001.

$$\sum_{j=0}^{\infty} v_j = g \quad (7)$$

Siendo g un valor finito representa el cambio total en $y(t)$ debido al cambio unitario en $x(t)$.

4.1.3 Ruido en sistemas de ventilación

Los elementos del sistema HVAC¹⁴ que generan mayor intensidad de ruido son; el ventilador de propulsión y el ventilador de retorno. Los ventiladores centrífugos producen ruidos situados por lo general a lo largo del espectro completo de frecuencias audibles, alcanzando un valor máximo en la gama de bajas frecuencias, habitualmente entre 31,5 y 250 Hz. Como consecuencia, los ventiladores de un sistema HVAC típico determinan normalmente los límites de ruido de baja frecuencia en el espacio ocupado. Aunque las características de cada tipo de ventilador difieren en términos del nivel de ruido en función de su frecuencia, poseen un factor en común; los niveles más bajos de ruido se producen cuando se utiliza el ventilador en su punto de máxima eficacia de la curva de rendimiento.

4.1.3.1 Funcionamiento de un sistema de ventilación tradicional.

El tipo de ventilador conocido como ventilador propulsor o ventilador de encendido, es empleado a menudo en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), consiste en una hélice de ventilación centrífuga descubierta, situada en la pared de la cámara impelente¹⁵. El aire es aspirado por el ventilador, a través de una campana de entrada que descarga directamente en el interior de la cámara descubierta, que rodea a la hélice del ventilador. Esta descarga comprime la cámara impelente y la presión en la cámara expulsa a continuación el aire hacia el conducto anexo, como se muestra en la figura 6.

4.1.3.2 Ruido de frecuencia de los alabes

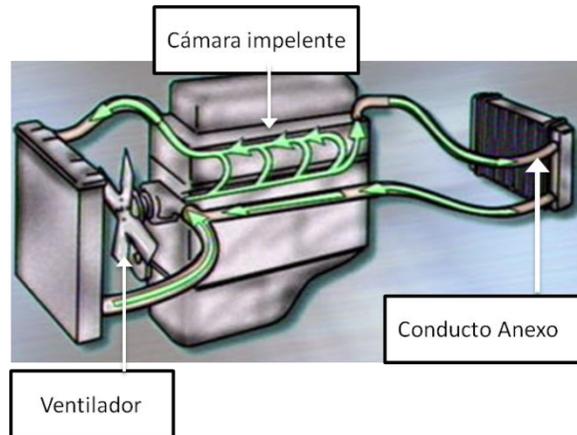
Cada vez que un alabe¹⁶ atraviesa un determinado punto, el aire situado en este punto recibe un impulso. La tasa de repetición del impulso, o frecuencia de paso del alabe normalmente llamada frecuencia del alabe, determina el tono fundamental emitido. Duplicando el número de alabes del ventilador, o la velocidad de giro, se consigue una duplicación de frecuencia del alabe básico. En conexión con esta regla lógica se producen varios tipos de sonido que dependen de la forma del impulso del aire.

¹⁴ Sigla proveniente del inglés referente a los sistemas de ventilación (*Heating Ventilation and Air Conditioning*)

¹⁵ Dispositivo utilizado para aumentar la presión de una cavidad introduciendo moléculas de aire atmosférico en su interior.

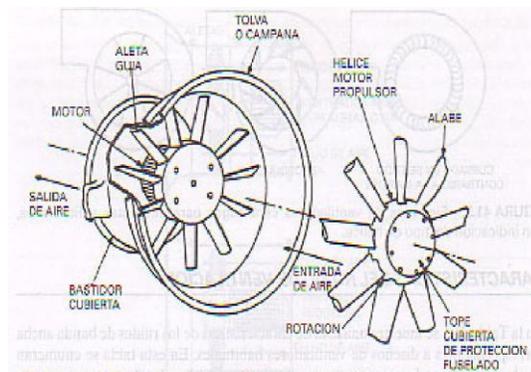
¹⁶ Cada una de las paletas curvas de la turbina que reciben el impulso del fluido (Real Academia Española, 2005).

Figura 6. Partes constitutivas y flujo de aire a través de un sistema de ventilación habitual.



Fuente: www.cdtextbook.com¹⁷

Figura 7. Ventilador Axial



Fuente: Cyril M., 1995

Los tonos de banda fina que genera un ventilador son fundamentales para el control de ruido del sistema de ventilación, en muchos casos relativos a problemas con ventiladores. La principal dificultad radica en un componente de frecuencias discretas, causado por la frecuencia de los alabes de la hélice. Se debería prestar atención particular a las bandas de octava, dentro de las cuales se produce este componente de frecuencia, ya que el oído es capaz de identificar un determinado tono en el ruido ambiental y este puede por lo tanto causar molestias.

¹⁷ CD X ONLINE eTEXTBOOK. Controlando un sistema de calefacción. www.cdtextbook.com

Las propiedades de atenuación del sistema deben adecuarse completamente a esta banda de octava:

$$fB = n X N \quad (8)$$

En donde:

fB = Frecuencia del alabe (Hercios)

n = Velocidad de ventilación (rps)

N = Número de alabes de la hélice del rotor.

4.1.3.3 Dispositivos terminales de ventilación

Un dispositivo terminal de ventilación es un elemento situado al final de un conducto a través del cual fluye o es evacuado el aire de una habitación, en un sistema de propulsión de aire los dispositivos terminales de ventilación, proporcionan aire al espacio distribuyéndolo de un modo mas o menos predecible, en un sistema de retorno de aire los dispositivos terminales de ventilación a través de los cuales se escapa aire proporcionado por los difusores se denominan habitualmente rejillas.

- Difusores: Los difusores tienen normalmente forma redonda, rectangular o de largas bandas estrechas (estos últimos denominados difusores lineales).
- Deflectores: Los difusores incorporan, por lo general, deflectores de aire como aspas, lengüetas y tolvas, que ayudan a distribuir el aire con regularidad en el espacio. Cuanto mayor sea la deflexión, mayor será el nivel de ruido que emiten los difusores. El nivel de potencia L_w , generado por el flujo de aire a través del difusor, aumenta normalmente en 16 dB cada vez que se dobla la velocidad en las bandas de octava situadas por debajo de 500 Hz, y de 18 a 24 dB en las bandas de octava situadas por encima de 1000 Hz.

Los datos de emisión de ruido de difusores se refieren por lo general a deflectores dispuestos en un ángulo de 0 grados (es decir sin deflexión de aire). Teniendo en cuenta que los difusores raramente se sitúan con este ángulo, al seleccionar el difusor se debería tener en cuenta el aumento del nivel sonoro respecto al del ángulo de deflexión.

El espectro y la intensidad de ruido dependen en gran medida del tipo de difusor y deflector.

4.1.3.4 Silenciadores activos

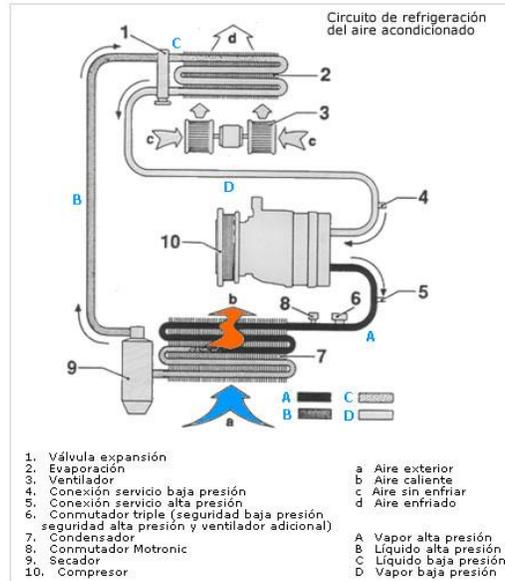
Un silenciador activo es un tipo especial de silenciador que incorpora una fuente de sonido (por ejemplo un altavoz) y genera ondas de sonido desfasadas con el sonido no deseado (ruido), que se propaga a través del conducto. Esta técnica de cancelación de ruido se limita normalmente a ondas planas de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que las dimensiones más amplias del conducto, como consecuencia, su aplicación se limita por lo habitual a frecuencias inferiores a 250 Hz. Gracias a la aplicación de procesamientos digitales de señales adaptados, es posible

cancelar el ruido de banda ancha así como los ruidos de frecuencia del alabe por medio de esta técnica.

4.1.4 Sistemas de aire acondicionado en vehículos.

La figura 8 muestra el sistema general de aire acondicionado en vehículos.

Figura 8. Circuito de refrigeración del aire acondicionado en vehículos.



Fuente: www.mecanicavirtual.org¹⁸

Partes Constitutivas: La mayoría de los vehículos existentes poseen tres diferentes tipos de sistemas de aire acondicionado, pero la concepción y el diseño de estos tipos son muy similares. Los componentes más comunes de estos sistemas son:

- Compresor

Comúnmente denominado el corazón del sistema. Como su nombre lo indica, comprime el gas refrigerante tomando para ello potencia del motor mediante una transmisión de corre. Los sistemas de aire acondicionado están divididos en dos lados, el lado de alta presión y el lado de baja presión; también denominados descarga y succión, respectivamente. La entrada del compresor toma el gas refrigerante de la salida del evaporador y, en algunos casos, lo hace del acumulador para comprimirlo y enviarlo al condensador, donde ocurre la transferencia del calor absorbido del interior del vehículo.

¹⁸ IMAGESARTIC. Esquema Circuito Refrigerante. www.mecanicavirtual.org

- Condensador

Aquí es donde ocurre la disipación del calor. El condensador tiene gran parecido con el radiador debido a que ambos cumplen la misma función. El condensador está diseñado para disipar calor, y normalmente está localizado frente al radiador, pero a veces, debido al diseño aerodinámico de la carrocería del vehículo, se coloca en otro lugar. El condensador debe tener un buen flujo de aire siempre que el sistema esté en funcionamiento. Dentro del condensador, el gas refrigerante proveniente del compresor, que se encuentra caliente, es enfriado; durante el enfriamiento, el gas se condensa para convertirse en líquido a alta presión.

- Evaporador

El evaporador está localizado dentro del vehículo, y sirve para absorber tanto el calor como el exceso de humedad al interior del mismo. En el evaporador, el aire caliente pasa a través de las aletas de aluminio unidas a los tubos; y el exceso de humedad se condensa en las mismas, el polvo que lleva el aire se adhiere a su vez a la superficie mojada de las aletas, luego el agua es drenada hacia el exterior.

La temperatura ideal del evaporador es 0 °C (32 °F). El refrigerante entra por el fondo del evaporador como líquido a baja presión. El aire caliente que pasa a través de las aletas del evaporador hace que el refrigerante dentro de los tubos se evapore (el refrigerante tiene un punto de ebullición muy bajo). En el proceso de evaporización el refrigerante absorbe grandes cantidades de calor, el cual es llevado por el refrigerante fuera del interior del vehículo. Existen otros componentes de los sistemas de aire acondicionado que trabajan en conjunto con el evaporador, puesto que deben existir controles para mantener la presión baja y la temperatura, pues si ésta disminuye por debajo del valor mencionado anteriormente, el agua producto de la condensación del exceso de humedad no solo se condensará, sino que se congelará alrededor de los tubos del evaporador, y esto disminuye la eficiencia de la transferencia de calor en el mismo.

- Dispositivos Reguladores De Presión

La temperatura del evaporador puede ser controlada mediante la regulación del flujo y la presión del refrigerante dentro del mismo. Existen muchos dispositivos creados para tal fin. A continuación se presentan los que se encuentran más comúnmente:

- Tubo orificio: Es probablemente el dispositivo más usado para regular la presión, y es el que más se utiliza en los vehículos de la Ford y la GM. Está localizado en el interior del tubo de entrada del evaporador, o en la línea de líquido, en algún lugar entre el condensador y la entrada del evaporador. Para conocer la ubicación exacta de este dispositivo, basta con tocar la línea de líquido y ubicar el punto donde la temperatura pasa de caliente a frío.
- Válvula de expansión térmica: Otro regulador de presión muy común es la válvula de expansión térmica, o TXV. Este tipo de válvula mide tanto la temperatura como la presión, y es muy eficiente regulando el flujo de refrigerante que entra al evaporador. Existen diversos tipos de TXV; pero, a pesar de ser muy eficientes, tienen ciertas desventajas con respecto al sistema de tubo orificio, pues al igual que el tubo orificio se pueden obstruir con

las impurezas del refrigerante, pero además poseen pequeñas partes móviles que se pueden atascar y tener un mal funcionamiento debido a la corrosión.

- Depósito – Secador

El depósito – secador se utiliza en el lado de alta presión de los sistemas que implementan una válvula de expansión térmica. Este tipo de válvula requiere de líquido refrigerante, y para tener la seguridad de que sólo eso entrará a dicha válvula, se utiliza el depósito – secador, el cual separa el gas y el líquido, además de eliminar la humedad y filtrar las impurezas. Normalmente el depósito – secador tiene un vidrio de nivel, en la parte superior, el cual se utiliza para recargar el sistema; en condiciones normales, las burbujas de vapor no deben ser visibles por el vidrio de nivel.

- Acumulador

Los acumuladores normalmente son utilizados en sistemas que utilizan tubo orificio, y están conectados a la salida del evaporador, en donde almacena el exceso de líquido que no se evaporó, debido a que si este líquido pasa al compresor éste se puede dañar, aunque ésta es su función principal, el acumulador también sirve para eliminar la humedad y las impurezas.¹⁹

4.1.5 Sistema electrónico de control

En esta sección se presentan los principales conceptos a tener en cuenta al diseñar un sistema de control activo de ruido.

4.1.5.1 Filtros digitales

Cumplen una tarea principal en el procesamiento digital de señales. Es usado para eliminar partes no deseadas dentro de la señal, como puede ser el ruido, o para limitar el ancho de banda dentro de la misma. Un filtro está construido sobre un procesador digital que efectúa operaciones matemáticas con valores muestreados de la señal. Para el funcionamiento de un filtro digital es necesario hacer una conversión de la señal analógica a digital, de tal forma que permita al procesador realizar las distintas operaciones a la señal, lo cual implica que para conocer el resultado del filtrado, después del proceso, es necesario hacer nuevamente la conversión digital a analógica de la señal²⁰, como se observa en la figura 9. Los principales tipos de filtros digitales se muestran en la figura 10.

Filtro FIR

Filtro de respuesta finita al impulso; esto significa que si la entrada del filtro es un impulso, la salida de este será un número limitado de términos no nulos.

Este tipo de filtro resulta bastante estable debido a que sólo presenta valores en los polos, es decir, que únicamente tendrá elementos en el numerador de la función de transferencia. Presenta ventajas

¹⁹ LA HISTORIA DEL AIRE ACONDICIONADO AUTOMOTOR. Partes de un Sistema de Aire Acondicionado Automotor En: www.monografias.com. 2000.

²⁰ ENCICLOPEDIA VIRTUAL DUIOPS. Filtro Digital. En: <http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/filtro-digital.htm>, 2007.

al momento de su implementación en distintas aplicaciones, porque permite realizar diseños que no introducen desfases en la señal, lo cual resulta conveniente en sistemas de audio²¹.

Filtro IIR

Filtro digital de respuesta infinita al impulso. Si la entrada corresponde a un impulso, como salida se tendrá un número ilimitado de términos no nulos, es decir, nunca volverá a un estado de reposo. Para obtener la salida se emplean valores de la entrada actuales y anteriores, además de realimentar algunos valores de la salida.

Una ventaja de este tipo de filtros, con respecto a los FIR, es obtener una misma respuesta empleando un menor número de coeficientes en un filtro de un menor orden, lo cual se traduce en menor costo computacional. Como desventajas se tiene que es bastante inestable con respecto al filtro FIR, además de generar desfases en la señal, lo cual puede corregirse al aumentarle el número de coeficientes al filtro²².

Figura 9. Proceso de filtrado de una señal análoga y sus tres fases: conversión análoga-digital, procesamiento de filtrado digital, conversión digital-análoga.

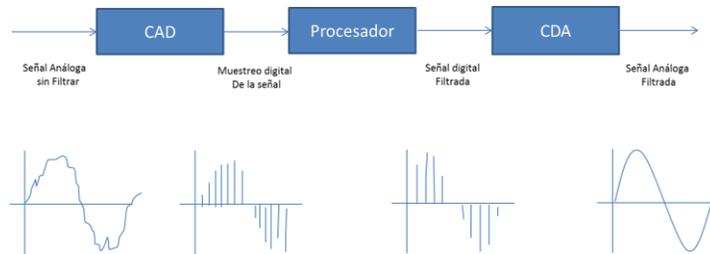
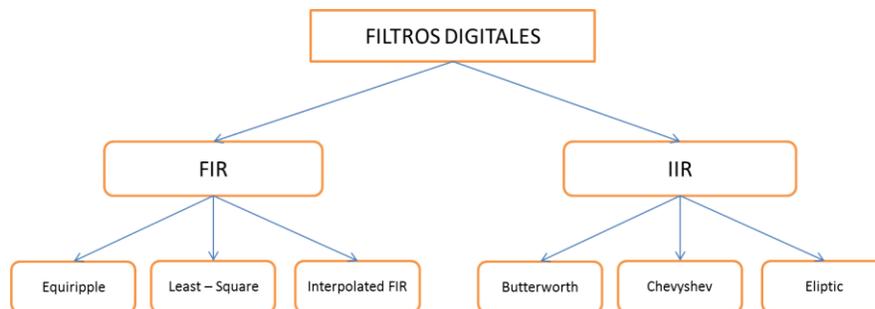


Figura 10. Esquema de principales filtros digitales, según su respuesta al impulso (finita o infinita) y métodos de diseño.



²¹ COBO PARRA, Fundamentos del Control Activo del Ruido. Op cit., p. 74-109.

²² ENCICLOPEDIA VIRTUAL DUIOPS. Op. cit.

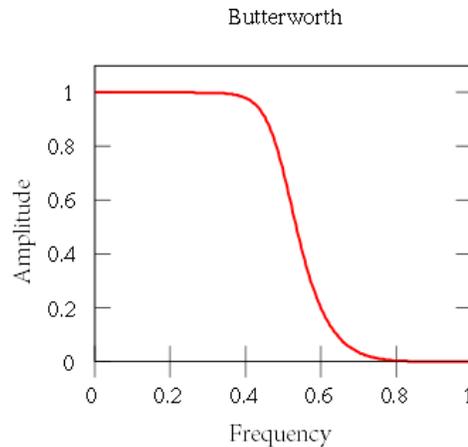
4.1.5.2 Filtros fijos

Se denominan filtros fijos debido a que no es posible variar ninguno de sus parámetros, como el orden y los coeficientes del mismo. En sistemas CAR, el cálculo de este tipo de filtros se hace a partir de conocer las características del sistema, el tipo de ruido a controlar, si este presenta comportamiento tonal o aleatorio, el ancho de banda del mismo y la influencia que tiene el recinto en donde se va a implementar.

Filtro Butterworth

Es un tipo de filtro electrónico, diseñado para tener una respuesta en frecuencia tan plana como matemáticamente sea posible en la banda de paso, también llamado filtro de magnitud máxima plana. Su respuesta en frecuencia es dependiente del orden en que este se diseñe. Para un filtro de primer orden, la respuesta cae a -6 dB por octava, de segundo orden -12 dB/oct, y así sucesivamente. Es el único filtro que mantiene la misma forma a partir de órdenes mayores (solo con una caída de mayor pendiente). Necesita de un mayor orden para cumplir los mismos requerimientos, comparado con un Chebyshev o elíptico²³. Resultando en mayor costo computacional. En la figura 11 se muestra el comportamiento en frecuencia del filtro butterworth.

Figura 11. Respuesta en frecuencia de un filtro butterworth pasa-bajo.



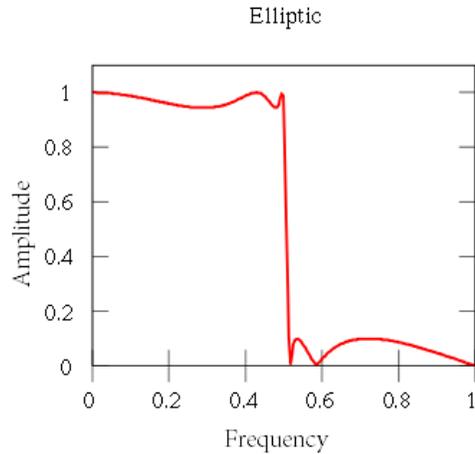
Filtro Elíptico

Tipo de filtro electrónico, diseñado para aplicaciones que requieren la mayor pendiente posible en la zona de atenuación. En caso de que sean aceptados los rizados en las bandas pasante y eliminada, este filtro optimiza la respuesta de la zona de atenuación a expensas de las bandas. Tomando una serie de especificaciones para cualquier filtro complejo, la aproximación elíptica será siempre el

²³ RAMÍREZ NUÑO, Juan C. Clasificación de los Filtros por su Respuesta. México: Universidad de la Salle Bajío, 2003.

diseño más eficiente, esto es, de menor orden. Por otra parte es el que presenta una fase menos lineal²⁴. En la figura 12 se muestra el comportamiento en frecuencia del filtro Elíptico.

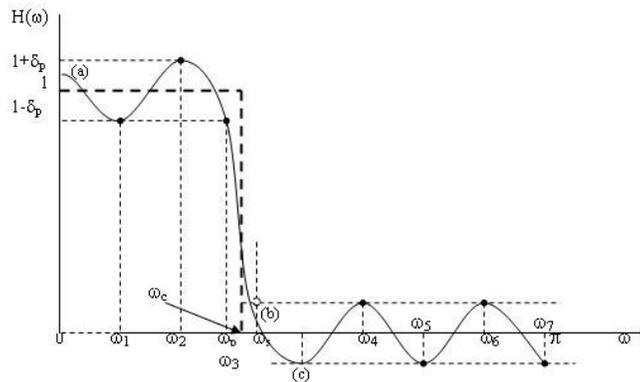
Figura 12. Respuesta en frecuencia del filtro elíptico pasa-bajo.



Filtro Equiripple

El diseño *equiripple* produce los filtros más eficientes (en cuanto a filtros FIR) esto es, filtros que cumplen las especificaciones con el mínimo número de coeficientes. Cuenta con el mismo rizado en la banda de paso y atenuada, según las especificaciones. Su diseño lleva un tiempo considerable, comparado con otros filtros FIR, que pueden tomar unos segundos; el *equiripple* puede fácilmente tomar de diez a veinte minutos. Además de esto, no hay garantía de que el algoritmo *Remez Exchange* (usado para crear el filtro) converja, puede converger a un resultado falso (se debe estar monitoreando)²⁵. En la figura 13 se muestra el comportamiento en frecuencia del filtro *equiripple*.

Figura 13. Respuesta en frecuencia del filtro *equiripple* pasa-bajo.



²⁴ Ibid.

²⁵ BORES SIGNAL PROCESSING. Introduction to DSP - Filtering: Design by Equiripple Method. En: http://www.bores.com/courses/intro/filters/4_equi.htm, 2009.

Filtro Wiener

El filtro de Wiener suele tener un lugar en el diseño temporal, en gran parte la comprensión de sistemas y diseños va ligada a su representación frecuencial.

La ecuación de un filtro de Wiener con respuesta impulsiva infinita y coeficientes Q se muestran a continuación:

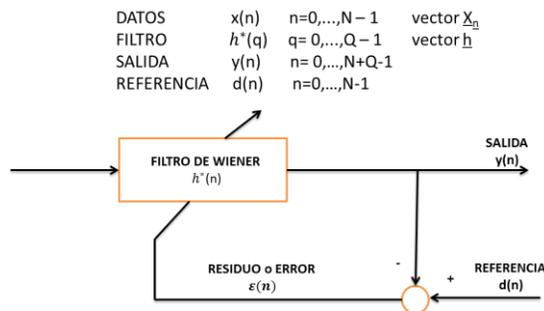
$$\sum_{q=0}^{Q-1} h^*(q)r_{xx}(1-q) = r_{dx}(l) \quad l = 0 \dots Q - 1 \quad (9)$$

Cuando la ecuación anterior incluye un filtro cuya respuesta se extiende de $-\infty$ a $+\infty$ el comportamiento del filtro de Wiener en frecuencia viene dado por la expresión:

$$H(\omega)S_x(-\omega) = S_{dx}(-\omega) \Leftrightarrow H^*(-\omega)S_x(\omega) = S_{xd}(\omega) \quad (10)$$

Siendo $H(\omega)$ la respuesta en frecuencia $S_x(\omega)$ la densidad espectral de la entrada y $S_{xd}(\omega)$ es la densidad espectral cruzada de los datos con la referencia, es de destacar que en general la solución óptima de Wiener, planteada a nivel frecuencial, produce un filtro no causal, por lo que cuando se implementan filtros FIR las conclusiones derivadas aquí tienen un carácter aproximado o no exacto. En otras palabras el propósito es encontrar un filtro de respuesta finita de Q coeficientes $h(n)(n=0, Q-1)$ tal que su respuesta a los datos, que en este caso será denominada la señal de entrada, produzca una salida lo más próxima a la referencia en términos de error cuadrático medio lo más mínimo posible, La situación se resume en la figura 14.

Figura 14. Diagrama del filtro Wiener.



Fuente: Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Catalunya²⁶

4.1.5.3 Filtros Adaptativos

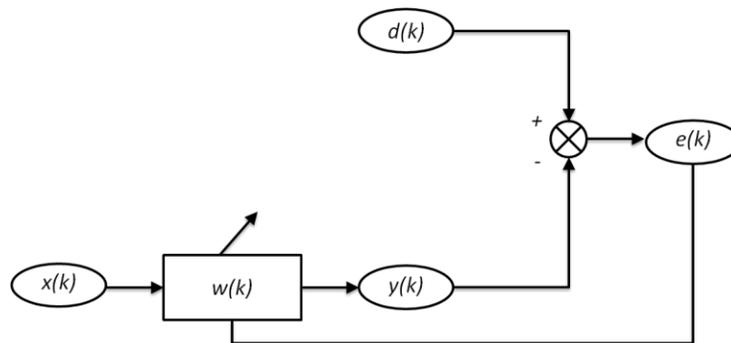
El filtro es un componente de gran importancia dentro de los sistemas de control activo debido a que es el responsable de generar una señal de control para el ruido a cancelar; este filtro de control toma muestras de la señal de entrada y las multiplica por coeficientes; estos coeficientes serán los responsables de generar la señal de salida. Ésta por su parte, se convertirá en una señal análoga usando un filtro de reconstrucción. Los filtros de control usualmente pueden ser filtros de respuesta al impulso finita (FIR).

En algunos casos, especialmente cuando hay resonancias en el sistema a controlar o si existe interferencia de la fuente secundaria en el sensor de referencia, el filtro de respuesta finita al impulso no es la mejor opción. Resulta más conveniente implementar un filtro de respuesta infinita al impulso (IIR), éste se selecciona por su capacidad de encontrar directamente los polos en un sistema de estas características. La salida de un filtro IIR es igual a la suma ponderada de los datos actuales y los datos anteriores y está definida en la siguiente formula:

$$y(k) = b_0x(k) + b_1x(k - 1) + \dots + b_nx(k - n) + a_1y(k - 1) + a_2y(k - 2) + \dots + a_my(k - m) \quad (11)$$

La ecuación para un filtro de respuesta finita al impulso (FIR) es obtenida al llevar los coeficientes “a” a cero. En la figura 15 se muestra el esquema de un filtro adaptativo.

Figura 15. Esquema de un filtro adaptativo donde; $d(k)$ señal deseada, $x(k)$ señal de referencia, $e(k)$ señal de error, $y(k)$ señal de control y $w(k)$ función de transferencia del filtro.



Método de filtrado más frecuente en sistemas CAR

Si se requiere procesar un ruido no continuo con un sistema CAR, se suele implementar por medio de un filtro adaptativo en el tiempo, el cual depende de la señal de referencia y señal de error, haciéndolo posible sólo para estrategias *feedforward*. El filtro usa la señal de referencia para

²⁶ CENTRO TECNOLÓGICO DE TELECOMUNICACIONES DE CATALUNYA. El Filtro de Wiener. En: <http://www.cttc.es/resources/doc/080313-capiv-38065.pdf>

generar la señal de alimentación al altavoz secundario. La función de transferencia de este filtro es actualizada en cada instante de tiempo por la señal de error. En un caso real es necesario tener en cuenta las funciones de transferencia del altavoz y de la vía de error o realimentación acústica. Se asume que los micrófonos de error y referencia tienen funciones de transferencia “unidad” (respuesta plana). Widrow (1975) desarrolló un algoritmo de mínimos cuadrados (LMS) para determinar los coeficientes de un filtro adaptativo a partir de un filtro Wiener fijo.

4.1.5.4 Algoritmos Adaptativos

Su función es generar los coeficientes óptimos para un filtro adaptativo.

Least Mean Squares (LMS)

Este algoritmo es implementado en los filtros adaptativos para encontrar los coeficientes del filtro que permitan obtener el valor esperado mínimo del cuadrado de la señal de error, definida como la diferencia entre la señal deseada y la señal a la salida del filtro. El criterio de error es la suma de los cuadrados de las señales de error, y la minimización de este criterio tendrá como resultado un control acústico efectivo. El proceso inicia con la adaptación basada en las señales de error²⁷, matemáticamente este proceso esta descrito así:

$$w(k + 1) = -\mu \nabla J(k) \quad (12)$$

Donde ∇J es el gradiente de la superficie de error en el punto en el cual se calcula el coeficiente del vector $w(k)$ y μ es el factor de convergencia de los coeficientes, que define la cantidad de gradientes negativos que son adicionados al sistema.

Filtered-X LMS (Fx-LMS)

Este algoritmo es uno de los más usados en CAR por su sencillez y robustez, sin embargo, la convergencia de éste es un poco lenta, además de tener gran dependencia de la señal de referencia. El proceso que realiza este algoritmo para lograr la adaptación consiste en la modelación de la función de transferencia teniendo en cuenta los retardos que presenta la señal en llegar a los sensores de referencia y de error. La expresión matemática para éste es la siguiente²⁸.

$$w(k + 1) = w(k) - 2\mu \epsilon(k) x(k - \otimes) \quad (13)$$

²⁷ HANSEN, Colin. The Electronic Control System En: Understanding Active Noise Cancellation. Taylor & Francis e-Library, 2003. p. 31 – 68.

²⁸ Ibid., p. 31 – 68.

Filtered-X Normalized (Fx-NLMS)

Esta variante del algoritmo LMS es ampliamente utilizada, la cual adapta el coeficiente de convergencia μ a la potencia de la señal de entrada, según:

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{LP_x(n)} \quad (14)$$

Donde α es una constante y $P_x(n)$ es la potencia de la señal de referencia $x(n)$ en el instante (n) . De esta manera el coeficiente $\mu(n)$, utilizado con señales de baja potencia, será mayor, acelerando el proceso de convergencia, mientras que con las señales de mayor potencia $\mu(n)$ será menor, asegurando la estabilidad del sistema²⁹.

Función de Transferencia del Camino de Cancelación

La función de transferencia electro-acústica entre la señal eléctrica de entrada al sistema de control y la salida eléctrica de los sensores de referencia, es un aspecto de gran importancia para los algoritmos adaptativos que, usualmente, se implementan para lograr la optimización de los filtros que se usan en los sistemas de control activo de ruido.

Una forma de conocer estos valores es mediante la obtención de la respuesta al impulso, que resulta ser el equivalente en el dominio del tiempo a la función de transferencia, en el dominio de la frecuencia. En otras palabras, el controlador necesitará un filtro de respuesta al impulso finita (FIR), ubicado entre la señal de referencia y el algoritmo de control para filtrar la señal de referencia antes que ésta sea usada por el algoritmo.

De esta forma el algoritmo ayuda a la optimización del filtro, aunque será dependiente de la precisión con la que se haya estimado la función de transferencia, errores en la estimación de la función de transferencia afectarán la capacidad de convergencia del algoritmo de control, haciendo que tome más tiempo en su optimización. Si el error estimado en la función de transferencia supera los 90 grados en fase (para sistemas mono canal), el algoritmo adaptativo puede tornarse inestable. En la práctica es mejor limitar error a menos de 45 grados.

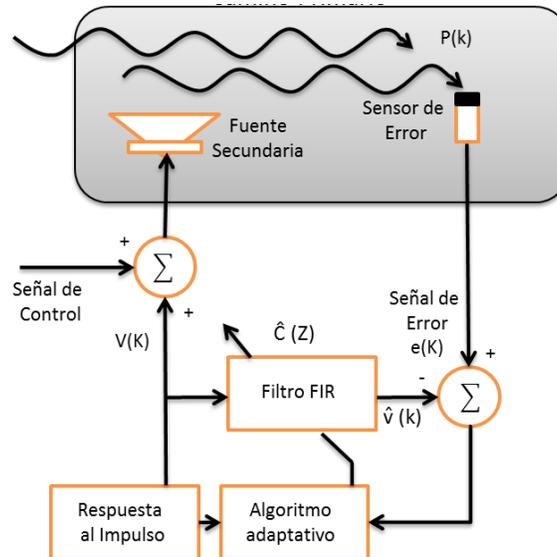
Sin embargo, la estimación de la función de transferencia puede ser cambiada con el tiempo, de ser así, se hace necesario hacer la estimación de la respuesta al impulso de manera *on line*. Algunas de las razones por las que la respuesta al impulso puede cambiar dentro de un recinto son los cambios de temperatura, los cuales afectan la velocidad del sonido entre el sensor de referencia y el sensor de error, también por cambios en el flujo de aire por los ductos de ventilación debido al polvo, o por los cambios que puedan presentar los sensores o los parlantes en sus componentes electrónicos. No

²⁹ GONZÁLEZ, F.A.; ROSSI, R.; MOLINA, G.R. y PARLANTI, G. Desarrollo e Implementación de un Controlador Activo de Ruido de Banda Angosta Adaptativo. En: Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (1: 2-4, marzo: Buenos Aires, Argentina). Memorias. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2011. p. 1-6.

obstante, la estimación de la respuesta al impulso de manera *on line*, introduce una serie de nuevos problemas al sistema.

La figura 16 muestra la estimación de la respuesta al impulso que se debe tener en cuenta dentro de los sistemas adaptativos.

Figura 16. Metodología para la estimación de la respuesta al impulso del camino de cancelación, *On-line*.



Off Line

La obtención de la respuesta al impulso dentro de un recinto se considera como estable y con valores fijos, de esta forma la modelación de un algoritmo adaptativo para los sistemas de control se hace teniendo en cuenta los valores medidos inicialmente de lo que será la función de transferencia dentro de este recinto.

On Line

Como la función de transferencia tiene variaciones con el tiempo, éstas serán adquiridas constantemente por un sensor el cual toma como referencia un generador de ruido aleatorio durante algún tiempo determinado, calculando así los cambios que se presenten dentro del recinto a la respuesta al impulso del mismo³⁰.

³⁰ HANSEN, The Electronic Control System. Op. cit., p. 44.

Leaky Fx-LMS

Un sistema de control puede tornarse inestable debido a la acumulación de datos de error en el algoritmo adaptativo. Sin embargo, esto es un problema que se puede solucionar fácilmente removiendo una pequeña proporción de los datos más antiguos al momento de adquirir nuevos datos, cuando esta fuga es implementada, el gradiente entonces se convertirá en:

$$w(k + 1) = w(k)[1 - \mu\alpha] - 2\mu e(k)[c(k)^*x(k)] \quad (15)$$

Donde α es un número positivo referido al coeficiente de fuga. La ecuación de corrección de los coeficientes se obtiene mediante la modificación del criterio de error de la siguiente expresión:

$$J = e^2(k), \text{ Para } J = e^2(k) + \alpha ||w(k)||^2 \quad (16)$$

Donde $||w(k)||$ es la norma del vector $w(k)$ en el tiempo k .

Un beneficio adicional de adicionar una fuga al algoritmo es que la demostración se puede hacer matemáticamente, lo cual equivale a incluir un control forzado, que en términos de coste computacional resulta ser mucho más ligero. Esto puede ser utilizado para minimizar cualquier tendencia de las fuentes secundarias a elevar la potencia con respecto a las fuentes primarias, lo que representa una ponderación proporcional al cuadrado de las actividades de control. Para alcanzar un mejor rendimiento de este algoritmo se hace necesario hacer que la fuga de coeficientes sea proporcional a la cuarta parte del esfuerzo de control³¹.

Filtered-U RLMS (Fu-RLMS)

Este algoritmo es implementado para los filtros de respuesta infinita y es de gran viabilidad utilizarlo en casos en los que el recinto presenta resonancias o realimentación acústica en el sensor de referencia. Debido a que los resultados de un filtro de respuesta infinita pueden ser mejores que los que presente un filtro de respuesta finita; para estos casos, el algoritmo de actualización de coeficientes constantes es el filtrado-u RLMS, el cual, para su implementación en sistemas *feedforward* se describe con la siguiente ecuación³²:

$$a(k + 1) = a(k) - 2\mu e(k)f_x(k) \quad (17)$$

Donde a representa los coeficientes del filtro.

³¹ Ibid., p. 49.

³² Ibid., p. 52.

4.1.5.5 Selección del Microprocesador

El único tipo de microprocesador eficiente para el control activo de ruido es el DSP debido a que estos procesadores son especializados en proceso matemáticos y esto es de gran beneficio para la implementación de estos sistemas, pues los coeficientes del filtro implican un gran número de multiplicaciones. Existe una amplia gama de DSP en el mercado con diferentes precios y características, dos de las principales variables que se deben tener en cuenta son el formato de los datos (punto fijo o punto flotante) y la precisión de los mismos (16 o 32 Bits). Los que presentan mejor rendimiento, para un sistema de control activo de ruido, son los de 32 bits de punto flotante ya que pueden mejorar problemas asociados al rango dinámico y a la cuantificación³³.

4.1.5.6 Consideraciones de Retardo de Grupo

Matemáticamente el retardo de grupo $\tau(\omega)$ es obtenido de la siguiente fórmula:

$$\tau(\omega) = -\frac{d}{d(\omega)}\theta(\omega) \quad (18)$$

Donde $\theta(\omega)$ es la respuesta en fase a la función de transferencia con respecto a la frecuencia ω . Por lo tanto, la respuesta en fase de algún componente del sistema se puede determinar midiendo la pendiente de la gráfica de respuesta de fase de la función (Entrada/ Salida) de este componente, la pendiente de esta gráfica será una buena aproximación del retardo de grupo con respecto a la frecuencia.

Físicamente, el retardo de grupo es la cantidad de tiempo que demora una señal en pasar por algún componente; éste es de gran importancia en los sistemas de control *feedforward* ya que influye directamente en la estabilidad del sistema, y es determinante para deducir la distancia mínima permitida entre el sensor de error y la fuente secundaria³⁴.

4.1.5.7 Tasa de muestreo digital

Un factor importante, en el resultado total de un sistema de control activo, es la razón de muestreo a la cual se realice la conversión análoga – digital (A/D) ya que ésta también afecta otros parámetros como la duración optima del filtro y el coeficiente de convergencia óptima. Si la frecuencia de muestreo es demasiado rápida, se requiere que el filtro sea demasiado largo para obtener un resultado determinado y controlar así ruidos tonales. Una tasa de muestreo muy alta puede producir que el filtro termine teniendo un costo computacional mayor, afectando la precisión de los resultados. Una solución para mantener la tasa de muestreo constante es aumentar la duración del filtro, sin embargo esto afecta directamente la estabilidad del algoritmo adaptativo.

³³ Ibid., p. 60.

³⁴ Ibid., p. 61.

4.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO

En esta sección se presenta la normativa utilizada para el desarrollo del proyecto.

4.2.1 ISO 5128:1980. “Acoustics – Measurement of noise inside motor vehicles”.

Esta norma especifica las condiciones para obtener niveles y espectros de ruido reproducible y comprable al interior de todo tipo de vehículos motorizados destinados a uso en carreteras, incluyendo vehículos en los que el conductor o pasajeros ocupan una cabina abierta o únicamente un área bien definida, pero exceptuando tractores y maquinaria de campo.

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados con los siguientes fines:

- Decidir si el ruido al interior del vehículo esta de acuerdo con especificaciones máximas.
- Estimar el daño auditivo en conjunto con los datos de exposición al ruido.
- Orientar un programa de mediciones mas elaboradas para propósitos de estudio en procedimientos de reducción de ruido.

A continuación se describen los lineamientos que se deben tener en cuenta para la obtención de datos acordes a esta normativa.

Método de medición según ISO 5128

Tipo de sonómetro: Mínimo clase 1, omnidireccional.

Características de la medición:

- Características dinámicas: Fast
- Ponderación: A (lineal y C son opcionales)
- Valores medidos: LpA, nivel de presión sonora en dB.
- Para análisis espectral: 1/1 octava o 1/3 de octava, en dB, cubriendo el rango mínimo de 45 – 11200 Hz.
- Medir la velocidad del motor con una exactitud de al menos 3%.

Ambiente acústico, condiciones ambientales, ruido de fondo:

- Distancia a objetos grandes: >20m. ; Solo se permiten reflexiones de la calle.
- Temperatura: -5 a 35 grados centígrados.
- Vel. Viento: < 5m/s, medida a una altura de 1,2m.
- Radio del nivel medido/ruido de fondo (instrumentos de medición): >10dBA.

Condiciones del vehículo:

- Calibrado según especificaciones del fabricante, (combustible, aceite, tiempo de ignición).
- El motor debe estar en un régimen estacionario (mínimo RPM).

- No más de dos personas, toda medición se debe realizar con el conductor presente como mínimo.
- Rejillas de ventilación, ventanas, deben estar cerradas excepto si se investigara sobre estas.

Posicionamiento micrófono

- Altura de los oídos, y en la posición de los ocupantes. Una posición debe ser la del conductor.
- Distancia de micrófonos hacia paredes o tapicería: >15 cm.
- Orientados en posición de máxima sensibilidad, donde el ocupante usualmente mira.
- Coordenada vertical: 0,7 +/- 0.05 m
- Coordenada horizontal: 0,2 +/- 0.02 m, a la derecha de la cabeza del conductor.
- Mínimo 2 mediciones para cada posición de micrófono, para cada condición de operación. Si la diferencia de estas es mayor a 3dB realizar más mediciones.

4.2.2 ISO 3382:2008. *“Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms”.*

Esta norma especifica los métodos para la medición de tiempo de reverberación en recintos. No se restringe a auditorios o salas de conciertos, se aplica también a recintos para palabra, música o donde el control de ruido es considerado. Describe los procedimientos de medición, los dispositivos necesarios, la cobertura requerida y métodos para evaluar los datos. Además esta dirigida a la evaluación de parámetros acústicos derivados de la respuesta al impulso del recinto.

En este proyecto, la norma es utilizada como base para obtener la respuesta al impulso de la cabina del vehículo, de tal manera que sea posible alcanzar resultados confiables y repetibles. Los lineamientos a seguir para la obtención de este dato, acorde a la normativa, se describen a continuación.

Método de medición según ISO 3382

Para la medición de la respuesta al impulso integrada (medida directamente utilizando una fuente impulsiva).

Niveles de señal requeridos:

- 45 dB por encima del ruido de fondo (para mediciones de T30).
- 35 dB por encima del ruido de fondo (para mediciones de T20).

Posiciones de medición → Baja cobertura (utilizada para propósitos de control de ruido).

- Posiciones de fuente representativas a las fuentes originales de ruido.

- Posiciones de captura en aéreas donde las personas normalmente están presentes (mínimo 1 posición).

Características direccionales y rango en frecuencia de los dispositivos:

- Fuente:
 - Omnidireccional.
 - Ancho de banda: 100 – 5KHz [1/3 de octava] o 125 – 4KHz [1 octava].
- Micrófono(s):
 - Omnidireccional.
 - Respuesta en frecuencia plana: 100 – 5KHz [1/3 de octava] o 125 – 4KHz [1 octava].

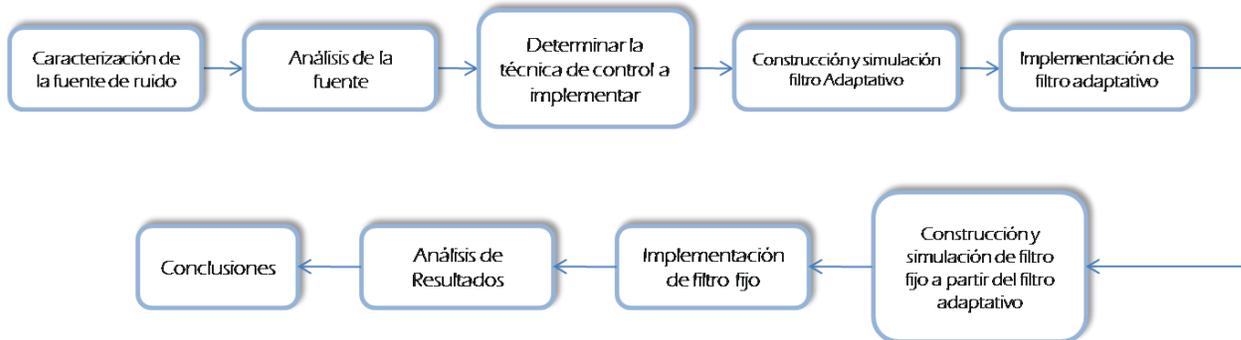
Numero de mediciones:

- 3 repeticiones por punto de medición.

5. DESARROLLO INGENIERIL

El diseño del sistema de control activo de ruido se lleva a cabo siguiendo las etapas descritas en la figura 17.

Figura 17. Etapas para el desarrollo del proyecto.



Este diagrama muestra únicamente las principales fases para el desarrollo del proyecto pues estas, en su totalidad, son descritas detalladamente a continuación.

5.1 ANÁLISIS DE LA FUENTE DE RUIDO

La primera etapa en el diseño del sistema CAR corresponde al análisis de la fuente de ruido y sus diferentes configuraciones o variables que producen modificaciones en los niveles de ruido emitidos.

Conocer el nivel de presión sonora (NPS) generado por la fuente de ruido, en sus distintas configuraciones (velocidades del ventilador y grado de apertura de las rejillas), es un parámetro clave para determinar el grado de molestia causado y así, poder limitar el sistema de control activo únicamente a configuraciones de fuente específicas, en las cuales sea relevante controlar el ruido.

La fuente de ruido a controlar (ruido producido por el sistema de ventilación) dispone de cuatro configuraciones asociadas a la velocidad de giro del ventilador o RPM. Además, el grado de apertura de las rejillas laterales de ventilación puede ser variado resultando en configuraciones adicionales. En este análisis se consideran 3 estados de apertura diferentes: totalmente cerradas, totalmente abiertas y 50% abiertas.

La variación en el RPM y la apertura de las rejillas causa una variación en la intensidad de ruido percibida, la cual es cuantificada mediante la norma ISO5128:1980³⁵. Esta especifica las condiciones y métodos para la obtención de niveles de ruido comparables al interior de vehículos.

³⁵ INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARIZATION. ISO5128:1980 Acoustics- Measurement of noise inside motor vehicles. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=11127, 1980.

Se requiere que la medición sea realizada teniendo en cuenta los siguientes requerimientos principales (los demás son detallados en la sección 4.2.1):

- Sonómetro Tipo 1.
- Configuración del sonómetro en ponderación A.
- Características dinámicas del sonómetro en configuración *Fast*.
- Rango de frecuencia mínimo: 45 - 11200 Hz
- Ubicar el vehículo en un espacio libre de reflexiones laterales provenientes de construcciones cercanas.
- Posicionar el micrófono del asiento del conductor a máximo 20 +/- 2 cm del eje central de la silla, y a una altura de 70 cm sobre la silla.
- Tomar como mínimo dos mediciones por posicionamiento de micrófono.

Esta medición se realiza utilizando el sonómetro *RION NA-27*, con el conductor presente y el motor encendido a 1000 RPM, siendo estas las condiciones estándar del vehículo sobre las cuales se realiza el control de ruido. Adicional a las recomendaciones de la norma, se recolectan datos con el sonómetro en ponderación lineal, con el objetivo de cuantificar el contenido espectral en frecuencias bajas. En el Anexo A se muestra el dispositivo utilizado para recolectar los datos y la ubicación del vehículo en un espacio libre de reflexiones laterales.

En la sección 6.1 se presentan resultados obtenidos para los niveles de ruido asociados a las velocidades de funcionamiento (RPM) y a los estados de apertura de las rejillas laterales.

5.1.1 Determinación de la velocidad (RPM)

Se decide implementar el sistema de control sobre la velocidad 4, debido al análisis que se muestra en la sección 6.1.1.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DE RUIDO

La siguiente etapa en el diseño del sistema CAR corresponde a la caracterización de la fuente de ruido, proceso que permite conocer las características espectrales de la señal a controlar. Estas determinan la conveniencia de implementar un sistema CAR en la atenuación de este tipo de ruido y permiten establecer el ancho de banda de su funcionamiento.

En esta caracterización es necesario tener en cuenta, principalmente, factores como reflexiones, propiedades acústicas de los materiales y geometría del recinto; los cuales dificultan el análisis debido a los cambios de fase y frecuencia que producen sobre la señal original, motivo por el cual se busca obtener la señal anecoica³⁶.

³⁶ Señal totalmente libre de reflexiones acústicas, producidas por la proyección del sonido dentro del recinto.

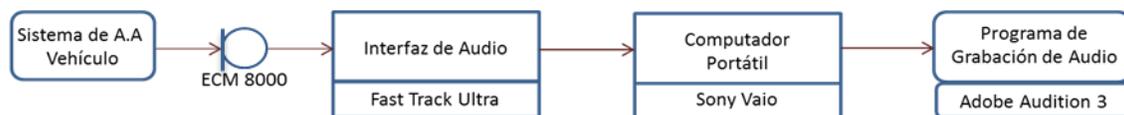
Los datos necesarios para deducir la señal anecoica $x(t)$, generada por la fuente de ruido son; la respuesta al impulso del recinto $h(t)$ donde se propaga la señal (Ver Anexo B), y la señal de ruido con influencia del recinto (o señal de salida del sistema) $y(t)$.

La respuesta al impulso de la cabina del vehículo, se mide directamente utilizando una fuente impulsiva, como se establece en el apartado 5.3 de la norma ISO3382³⁷. El proceso consiste en generar una señal impulsiva, en la posición de la fuente de ruido y capturarla en la posición del oyente. Los requerimientos para esta medición son detallados en la sección 4.2.2.

En este caso, se utilizan bombas calibre *R12* como fuente impulsiva, las cuales se ubican cerca a las rejillas de ventilación del sistema de aire acondicionado (Ver Anexo C). Utilizando el sonómetro Svantek 943A, se verifica que la señal producida por el estallido de estas supere en 45 dB el ruido de fondo. El impulso generado, es capturado por medio del micrófono de medición *Berhinger ECM8000*, en la posición del conductor, obteniendo la respuesta al impulso $h(t)$ del recinto en este punto.

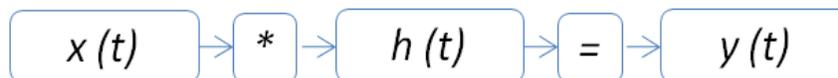
La señal de salida del sistema $y(t)$ se obtiene realizando una grabación del ruido producido por el sistema de ventilación en la cabina del vehículo, ubicando el micrófono en el espacio sonoro del conductor. Esta es almacenada como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 18.

Figura 18. Esquema del método de medición utilizado para capturar y almacenar la señal de salida del sistema $y(t)$.

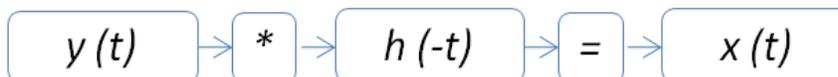


Como se menciona anteriormente, esta señal cuenta con componentes de la sala, los cuales se eliminan procesando la señal $y(t)$ y $h(t)$ como se muestra en la figura 19.

Figura 19. (a) Proceso de convolución de un sistema, donde $x(t)$ es la señal anecoica, $h(t)$ es la respuesta al impulso, $y(t)$ es la salida del sistema. (b) Proceso de de-convolución aplicado para la obtención de $x(t)$.



(a)



(b)

³⁷ INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARIZATION. ISO3382-2:2008. Op cit. p. 7.

De esta manera se garantiza que la señal de ruido, tomada como referencia para desarrollar el sistema de control, es el ruido original emitido por la fuente. El análisis espectral y temporal de este se presenta en el capítulo 6.2. En el Anexo D se muestra el montaje implementado para realizar la caracterización.

5.2.1 Determinación del ancho de banda

Conociendo la señal anecoica del sistema de ventilación, en su configuración escogida para controlar (Ver sección 5.1.1), se procede a limitar el ancho de banda sobre el cual opera el sistema de control activo de ruido.

Este tipo de ruido presenta un nivel de energía considerablemente alto en el margen de baja frecuencia, y disminuye logarítmicamente conforme esta aumenta. Por lo cual, es adecuado controlarlo mediante un sistema CAR, el cual se considera una estrategia de control eficaz en el margen de bajas frecuencias (< 500 Hz)³⁸.

El mayor nivel de energía registrado corresponde a -5 dBFS para la banda de 31.5Hz (Ver sección 6.2.1), por lo que el ancho de banda del sistema CAR debería comenzar a partir de esta frecuencia. Sin embargo, debido a las limitaciones de espacio al interior del vehículo para introducir un transductor que opere efectivamente en esta frecuencia, se decide limitar el sistema a partir de 50 Hz, reduciendo así el tamaño de la fuente secundaria a implementar.

La frecuencia superior para limitar el sistema es menor a 500 Hz y depende del espacio sonoro a controlar. La complejidad de la geometría en la que el sistema es implementado hace que una estrategia de control local sea más viable; buscando generar una zona de silencio de alrededor del micrófono monitor. Para este caso, el objetivo es generar una zona de radio mínimo 15 cm, correspondiente a la distancia interaural de una persona promedio. La frecuencia máxima que abarca estas dimensiones se deduce de la ecuación 5 en la sección 4.1.1.4 y corresponde al límite superior del ancho de banda de operación el sistema CAR:

$$F_{max.} = \frac{344 \text{ m/s}}{10 * (0.15\text{m})} = 230 \text{ Hz} \quad (4)$$

Por lo tanto la **frecuencia máxima** estimada de trabajo, a la que se espera obtener resultados es de **230 Hz**.

5.3 DETERMINACIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL ACTIVO

En esta sección, se pretende establecer el método de control mas adecuado para controlar el ruido producido por el sistema HVAC del vehículo, mediante un sistema CAR. Este se determina estableciendo:

³⁸ COBO; BRAVO; CUESTA; RANZ y SIGUERO. Op. cit., p. 1.

- Los objetivos acústicos (definir entre control local o global).
- La estrategia de control (definir entre *feedback* o *feedforward*).
- Software (se utilizan filtros fijos y adaptativos para su posterior comparación).
- Hardware.

Todo esto, considerando el tipo de ruido a tratar (su ancho de banda y variabilidad temporal). A continuación se detallan los puntos mencionados.

5.3.1 Tipo de ruido

El ruido a controlar es de banda ancha con mayor contenido energético en frecuencias bajas, por lo cual es limitado entre 50 y 230 Hz. Este es un ruido de propagación aérea, producido al interior de un ducto e irradiado hacia el recinto, en el cual se ubica el sistema de control. Su variabilidad temporal es aleatoria.

5.3.2 Objetivos acústicos

Debido a la complejidad geométrica del recinto a tratar, se plantea una estrategia de **Control local** para atenuar el ruido en el espacio sonoro del conductor. Esto es posible mediante el método de absorción activa. Éste consiste en hacer vibrar el diafragma de la fuente secundaria en contrafase con el campo primario. Por lo tanto se utiliza una única fuente secundaria ubicada en un espacio de mínima interferencia entre ésta y el micrófono de error.

5.3.3 Estrategia de control

Se plantea una estrategia de alimentación en adelantado o *feedforward*, esto debido a que presenta las siguientes ventajas sobre un sistema de retroalimentación o *feedback*³⁹:

- Los sistemas *feedforward* hacen una medición predictiva del ruido, antes de que éste llegue a la zona de cancelación, lo que permite un tiempo para procesar la señal. El ancho de banda, en el que un sistema *feedback* será efectivo, está limitado por el retardo entre la salida del controlador y el parlante, así como entre el sensor de error y la entrada del controlador. Estos retardos tienen un efecto menor en la configuración *feedforward*.
- Cuando el retardo, a través del sistema de control, excede 180 grados, el sistema *feedback* se vuelve inestable produciendo retroalimentación positiva, limitada únicamente por la capacidad del parlante y su amplificador.
- Es difícil prevenir que un sistema *feedback* oscile y se vuelva inestable cuando está sujeto a ruido en alta frecuencia.

³⁹ HANSEN, Foundations of Active Control. Op cit., p. 9-30.

- En un sistema *feedback* estable, la fuente de control y el micrófono de error deben estar lo mas cerca posible, resultando en problemas por efectos de campo cercano y produciendo una zona de atenuación mínima.
- Debido a la inestabilidad inherente de los sistemas *feedback*, los sistemas *feedforward* son preferidos, siempre que esté disponible una señal de referencia correlacionada con la señal de error.
- Debido a los retardos acústicos, un sistema de control *feedback* puede únicamente cancelar efectivamente ruidos periódicos.
- El sistema *feedback* adaptativo tiene la limitación de que la señal de entrada debe estar altamente auto-correlacionada (90%).
- Un sistema adaptativo es viable únicamente mediante *feedforward*, esto debido a que un algoritmo adaptativo exige un retardo de procesamiento considerable.

Es importante tener en cuenta que el sistema *feedforward* se puede volver inestable si se utiliza un micrófono para capturar la señal de referencia, y el sonido producido por la fuente de control alcanza el micrófono.⁴⁰

Esta retroalimentación generada por la interacción entre fuente secundaria y sensor de referencia, es minimizada con la implementación de un micrófono altamente direccional (*Shotgun*).

5.3.4 Software

Como se plantea en la sección 1.4.2, sobre el método de control activo escogido se implementan dos tipos de filtros, con el fin de determinar cuál presenta mejor desempeño para atenuar este tipo de ruido:

- Filtro adaptativo, por medio del algoritmo adaptativo **LMS** (se implementa en la sección 5.7).
- Filtro fijo de **Wiener** (se implementa en la sección 5.9).

Adicionalmente, se utiliza una variación del algoritmo LMS, conocido como Fx-LMS, con el cual se considera que se pueden lograr mejores resultados, pues en su estructura se tiene en cuenta el efecto del “Camino secundario” (camino electro- acústico entre la salida del controlador y la entrada del micrófono de error).⁴¹ Lo cual resulta indispensable considerando que al tratar con sonido (y su baja velocidad de onda), se producen cambios en la señal (fase y amplitud) desde que sale del controlador hasta que alcanza el micrófono de error. Los cambios son producidos por el retardo entre la fuente secundaria y el micrófono; la geometría del recinto y la no linealidad de los transductores.

Los filtros adaptativos mediante LMS y fijo Wiener son comparados en la sección 6.3.3.

⁴⁰ HANSEN, The Electronic Control System. Op. cit., p. 38.

⁴¹ Ibid., p. 46.

5.3.5 Hardware

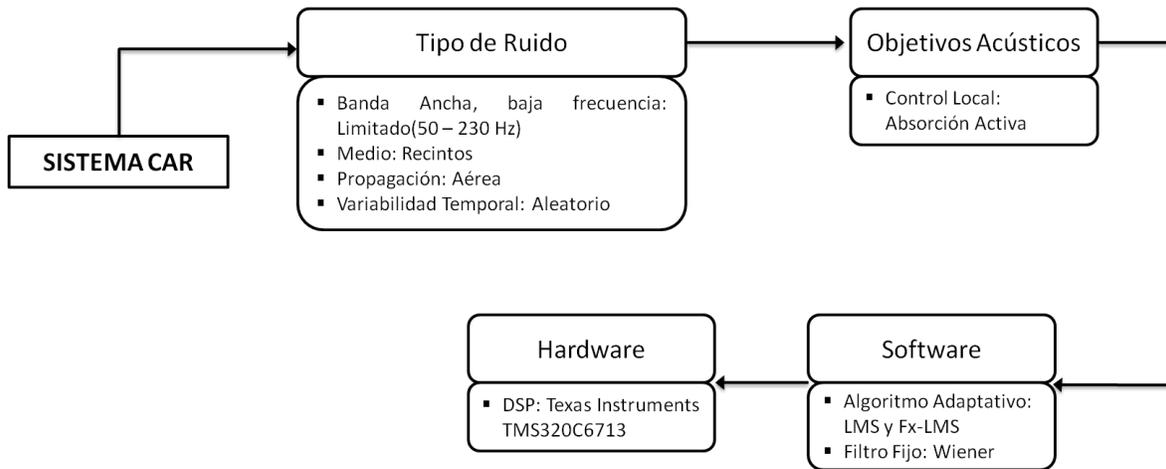
Los filtros mencionados anteriormente se implementan en un procesador digital de señales DSP. Esto debido a que son procesadores especializados con soporte realizado para computación matemática, presentando un beneficio particular en CAR, donde el cálculo de los coeficientes del filtro adaptativo requiere un número extenso de multiplicaciones.⁴²

El DSP escogido es el **TMS320C6713** de Texas Instruments. Éste cuenta con un formato de datos de punto flotante y una precisión de 32 Bit. Se selecciona con estas características ya que a que una unidad con precisión de 16 bit punto fijo, sólo presenta buenos resultados en la reducción de ruido tonal y no funciona como controlador para propósitos generales, principalmente por errores de cuantización, mientras que una precisión de 32 bits disminuye los problemas asociados con el rango dinámico y los errores de cuantización, aumentando el máximo grado de atenuación posible.

5.3.6 Resumen método de control

En la figura 20 se muestra un resumen del método de control escogido.

Figura 20. Esquema del método de control activo de ruido.



5.4 ANÁLISIS FILTRO LIMITADOR

La selección del filtro digital que se implementa para limitar el ancho de banda de funcionamiento de un sistema CAR, es definitivo sobre el resultado que se espera del mismo, ya que factores como el orden del filtro y/o la respuesta al impulso (finita o infinita) de éste, pueden llegar a producir controles muy complejos de implementar o que requieran sistemas computacionales de gran poder,

⁴² Ibid., p. 60.

afectando su funcionamiento en tiempo real; por otro lado, puede suceder que el sistema de control se torne inestable, adicionando ruido en lugar de producir atenuación⁴³.

La metodología realizada en esta sección del proyecto consiste en comparar tres distintos tipos de filtros digitales diseñados en MATLAB: dos filtros IIR (*butterworth*, elíptico) y un filtro FIR (*equiripple*), con el fin de analizar aspectos que afectan un sistema CAR, tales como: respuesta en frecuencia, respuesta en fase, retardo de grupo y orden del filtro (relacionado al costo computacional) para la fuente de ruido caracterizada, determinando el filtro más adecuado para implementar en el sistema.

5.4.1 Diseño filtros

El diseño de los filtros se realiza utilizando el bloque “FDA Tool” en *Simulink*. Esta herramienta permite la construcción de diferentes clases de filtros IIR y FIR, produciendo como resultado el filtro de menor orden que cumpla con las características estipuladas.

Se diseñan tres filtros pasa banda: Elíptico, Butterworth y Equiripple, con las características que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características en frecuencia y magnitud para el diseño de los filtros digitales.

Filtros Pasa Banda	
Frecuencia de muestreo (Hz)	500
Frecuencia de corte 1 (Hz)	40
Frecuencia de paso 1 (Hz)	50
Frecuencia de paso 2 (Hz)	230
Frecuencia de corte 2 (Hz)	240
Rizado en la banda de paso (dB)	1
Rizado en la banda de atenuación (dB)	60

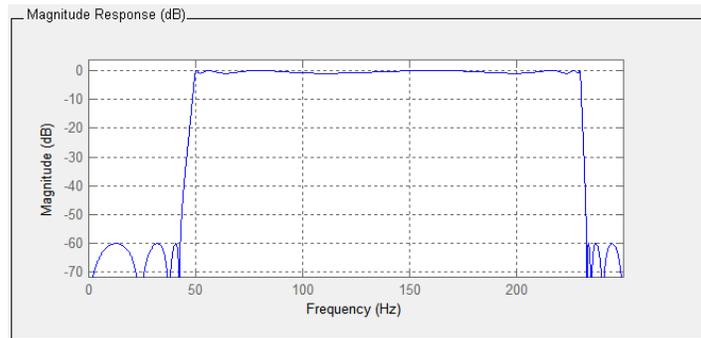
A continuación se presenta el análisis de los parámetros: orden del filtro, respuesta en frecuencia, respuesta en fase y retardo de grupo. Estos afectan la señal al pasar por el proceso de filtrado y condicionan el desempeño del sistema de control.

5.4.2 Filtro IIR Elíptico

- Mínimo orden posible: **17**
- Respuesta en frecuencia: Presenta una pendiente mayor hacia la frecuencia de corte 2, y un rizado no homogéneo en las bandas de atenuación.

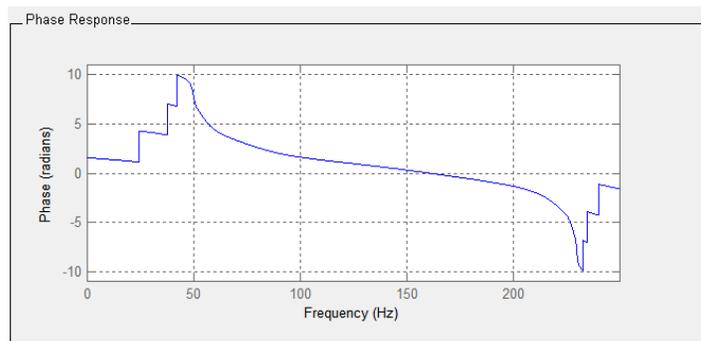
⁴³ COBO PARRA, Fundamentos del Control Activo del Ruido. Op cit., p. 74-109.

Figura 21. Respuesta en frecuencia del filtro elíptico.



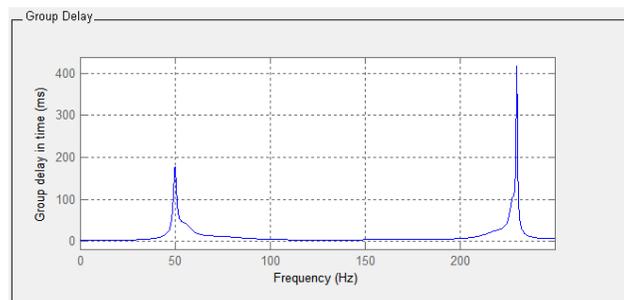
- Respuesta en fase: Se observa una respuesta no lineal en fase antes de la frecuencia de paso 1 y la frecuencia de paso 2.

Figura 22. Respuesta en fase del filtro elíptico.



- Retardo de grupo: La señal es retrasada 200ms en la frecuencia de 50Hz y más de 400ms en la frecuencia de 230Hz, con un ancho de banda reducido alrededor de estas.

Figura 23. Retardo de grupo del filtro elíptico.

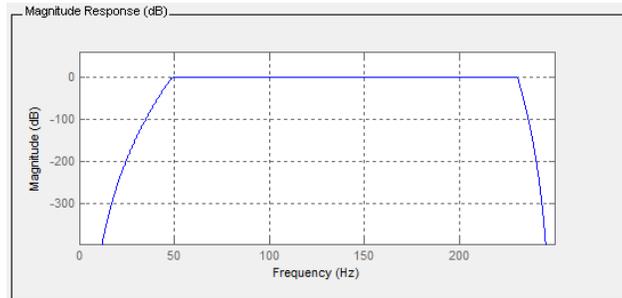


5.4.3 Filtro IIR Butterworth

- Mínimo orden posible: **62**

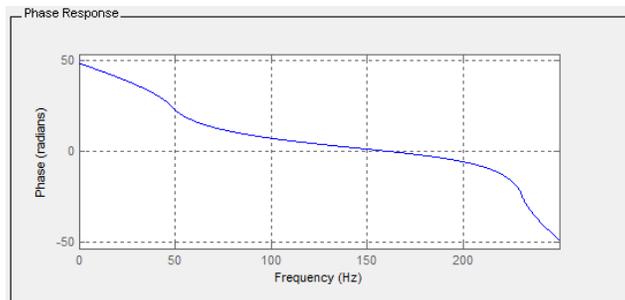
- Respuesta en frecuencia: Se observa una respuesta plana, tanto en la banda de paso como en la banda atenuada, teniendo un rizado irrelevante en estas.

Figura 24. Respuesta en frecuencia del filtro Butterworth.



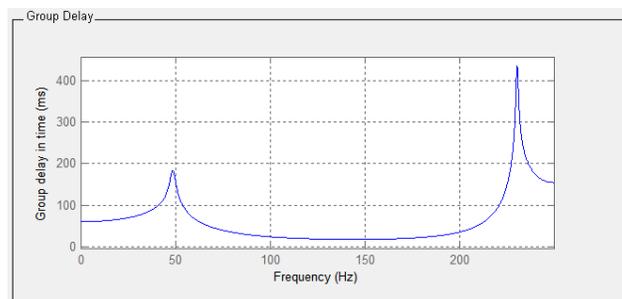
- Respuesta en fase: Se observa una respuesta no lineal en fase afuera de las frecuencias de corte, presentando un comportamiento más homogéneo en estas.

Figura 25. Respuesta en fase del filtro Butterworth.



- Retardo de grupo: La señal es retrasada 200ms en la frecuencia de 50Hz y más de 400ms en la frecuencia de 230Hz, con un ancho de banda considerable alrededor de estas.

Figura 26. Retardo de grupo del filtro Butterworth.

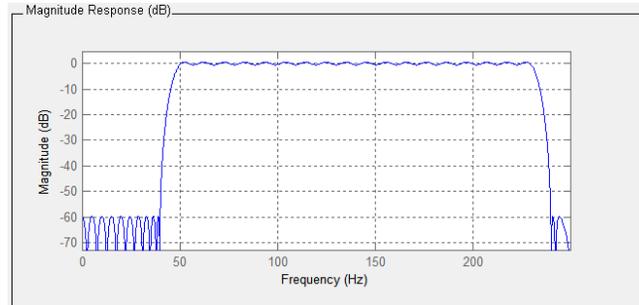


5.4.3 Filtro FIR Equiripple

- Mínimo orden posible: **99**

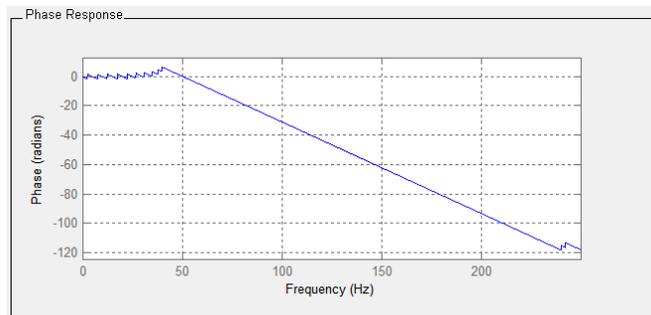
- Respuesta en frecuencia: Presenta una pendiente igual en ambas frecuencias de corte, además de un rizado homogéneo antes y después de estas.

Figura 27. Respuesta en frecuencia del filtro Equiripple.



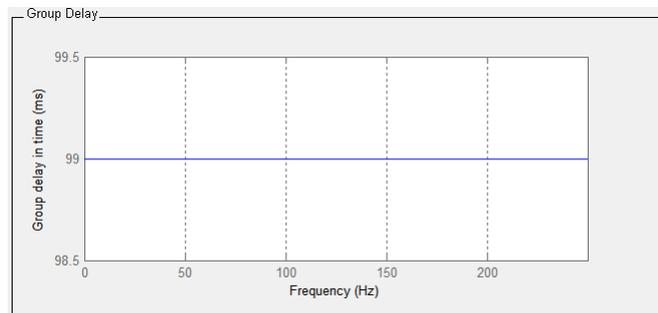
- Respuesta en fase: La fase es retrasada linealmente entre las frecuencias de corte.

Figura 28. Respuesta en fase del filtro Equiripple.



- Retardo de grupo: Al ser un filtro FIR, su fase es lineal, por lo que el retardo de grupo se hace igual para todas las frecuencias. En este caso la señal es retardada 99ms, constantemente a través del espectro.

Figura 29. Retardo de grupo del filtro Equiripple.



5.4.4 Determinación filtro limitador del ancho de banda

Conociendo el comportamiento de estos filtros digitales en el dominio de la frecuencia, la fase y el tiempo que tarda en procesar una señal, se escoge el filtro más óptimo para usar en el control activo de ruido, para esto se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El filtro IIR Elíptico cumple con las características requeridas con un menor orden (17), por lo que genera un menor costo computacional respecto a los demás (Butterworth: 62 y Equiripple: 99), siendo esto de gran utilidad en aplicaciones de tiempo real.
- El filtro Butterworth posee la mejor respuesta en frecuencia, con un rizado irrelevante en la banda de paso y atenuada (figura 24). Por lo tanto la amplitud de la señal no se ve afectada en el proceso de filtrado, lo que si sucede en los filtros Elíptico (figura 21) y Equiripple (figura 27).
- El filtro FIR Equiripple presenta un retardo de grupo constante para todo el espectro de frecuencias (figura 29), impidiendo que se produzcan desfases en frecuencia inexistentes en la señal original, los cuales afectan la linealidad del sistema. Estos retrasos se producen en ambos filtros IIR diseñados, Elíptico (figura 23) y Butterworth (figura 26).

Debido a la importancia de mantener la fase lineal en un sistema CAR, se considera el filtro FIR Equiripple el más adecuado.

Por lo tanto los filtros que se implementan en este sistema, para limitar el ancho de banda y para generar la señal de cancelación, son filtros **FIR**.

5.5 ELECCIÓN DE LOS MATERIALES

Sonómetro: SVAN 943A, Svantek

Se utiliza este sonómetro por la facilidad de préstamo por parte de la universidad para el desarrollo de este proyecto, además de ser un sonómetro tipo II de fácil configuración y resultados confiables.

Software: Adobe Audition 1.0, plug-in Aurora Beta, MATLAB 7.12 (R2011a).

Micrófonos de Medición y Señal de Error: ECM8000, Behringer.

Se selecciona por la respuesta en frecuencia ya que para el rango audible es de respuesta plana (15Hz – 20KHz) además de las características omnidireccionales y de gran sensibilidad de captura.

Micrófono Señal de Referencia: Shotgun AT8015, Audio-Technica.

Se selecciona este micrófono por ser de tipo *shotgun* el cual presenta características de captura muy direccional, evitando que la señal de referencia del sistema esté contaminada con señales provenientes de la fuente secundaria o de otras fuentes.

Interfaz de Audio: Fast Track Ultra, M- Audio.

Se implementa esta interfaz de audio debido a su calidad de conversión análoga – digital; además de tener disponibilidad de tiempo completo de este dispositivo.

Fuente Secundaria: Home theater- subwoofer, Inspire GD580, Creative.

Se selecciona este dispositivo, debido a que presenta la respuesta en frecuencia necesaria para implementarse como fuente secundaria en el proyecto ya que es necesaria una fuente capaz de responder linealmente entre 50Hz y 230Hz, ancho de banda en el cual se pretende hacer la cancelación de ruido.

Tarjeta DSP: TMS320C6713, Texas Instruments.

Se selecciona esta tarjeta DSP por disponer de la cantidad de entradas necesarias para realizar un control activo de configuración *feedforward*, también es apropiado para tal fin porque la velocidad de procesamiento es adecuada para los algoritmos implementados. Otro factor determinante para el uso de este DSP es la capacidad de ser programado mediante *Matlab* de una manera sencilla, igualmente por la disposición que se tiene del mismo, ya que se encuentra a disposición de los estudiantes de la universidad.

Computador: VAIO VCP127FX, Sony.

La elección de este dispositivo se debe a la disposición de tiempo completo que se tiene del mismo.

Vehículo: Ford Laser 2001, sedan.

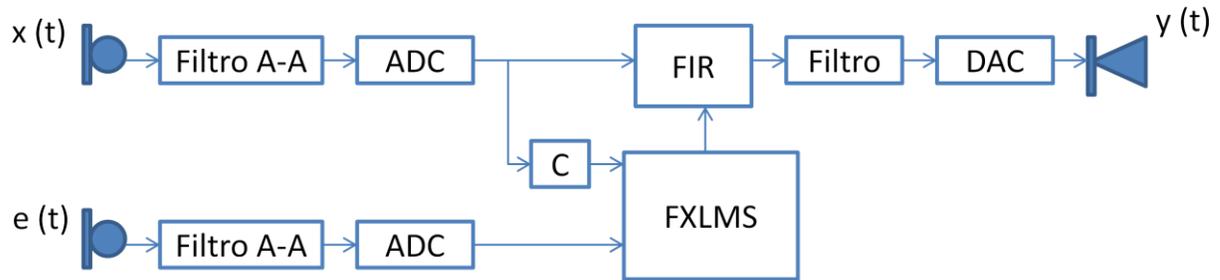
Este vehículo se selecciona por disponer tiempo completo del mismo.

5.6 DISEÑO SISTEMA CAR ADAPTATIVO MEDIANTE ALGORITMOS LMS

El sistema CAR adaptativo se diseña mediante una estrategia *feedforward*, utilizando un micrófono de referencia y uno de error. Se utilizan los algoritmos adaptativos LMS y Fx-LMS, éste último actualiza los coeficientes de un filtro FIR adaptativo en cada muestra, tomando como entrada la señal de referencia filtrada por el camino secundario (*filtered-x*) y la señal capturada por el micrófono de error $e(t)$.

Para que esto se pueda llevar a cabo, las señales de entrada al sistema son digitalizadas mediante conversores análogo- digital (ADC) y filtros anti- *aliasing*, para ser procesadas. El proceso inverso, filtros de reconstrucción y conversores digital- análogo (DAC), se implementa para reproducir la señal, luego del proceso. En la figura 30 se muestra un esquema del sistema CAR diseñado para el algoritmo Fx-LMS y sus componentes.

Figura 30. Diagrama del sistema CAR adaptativo *feedforward*, donde $x(t)$ señal de referencia, $e(t)$ señal de error, $y(t)$ señal de control y C , función de transferencia estimada del camino secundario.



El esquema anterior varía para el algoritmo LMS, en que la función de transferencia estimada del camino secundario es igual a 1 (no se tiene en cuenta).

5.6.1 Estimación función de transferencia del camino secundario

Como se observa en la figura 30, para la implementación de este diseño es necesario estimar la función de transferencia del camino secundario (para Fx-LMS). Este proceso se realiza mediante una medición acústica, que consiste en reproducir ruido blanco desde la fuente secundaria y capturarlo en el micrófono de error, todo esto con la fuente de ruido apagada (identificación *Off-line*)⁴⁴. De esta manera, se obtiene la señal de entrada al sistema $u(n)$ (ruido blanco generado) y la señal de salida del sistema $d(n)$, (ruido blanco capturado).

Para estimar la función de transferencia del sistema, es necesario primero identificar el camino secundario. Esta identificación se realiza mediante un filtro adaptativo que implementa el algoritmo LMS, partiendo de una señal deseada $u(n)$ y una señal de referencia $d(n)$; el algoritmo converge a los coeficientes necesarios para hacer $d(n)$ lo más parecido a $u(n)$. Cuando esto se logra, el algoritmo ha identificado correctamente el camino secundario y estos coeficientes equivalen al estimado de la respuesta al impulso (en el dominio del tiempo) o de la función de transferencia (en el dominio de la frecuencia) del camino secundario. En la figura 31 se muestra el método utilizado para realizar la identificación y la obtención de los coeficientes. En el Anexo E se presenta el montaje implementado para esta medición.

Las señales de referencia y deseada son muestreadas a 8000 Hz. La programación del filtro adaptativo FIR mediante algoritmo LMS se realiza en *Matlab*.

Una correcta identificación requiere encontrar la cantidad adecuada de coeficientes del filtro adaptativo, capaces de representar el camino secundario real. Para lograr esto, se varía la cantidad de coeficientes del filtro y se observan los resultados obtenidos en la identificación del camino secundario, como se muestra en la figura 32.

⁴⁴ Ibid., p. 44.

Figura 31. Esquema para la identificación del camino secundario, donde SP representa el camino secundario real y $Coeffs_S$, los coeficientes utilizados para la estimación de este.

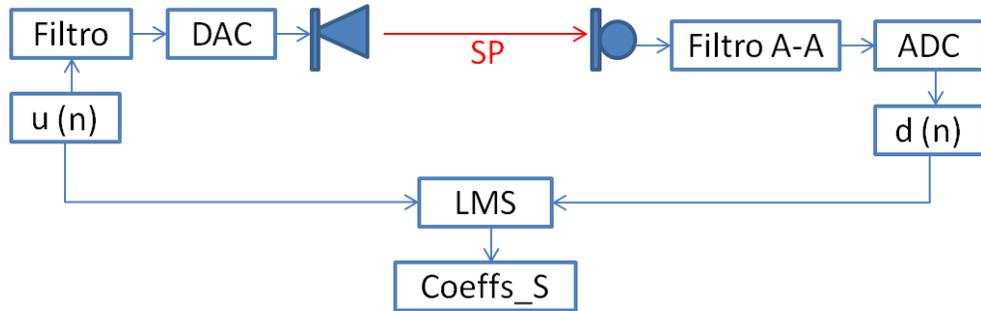
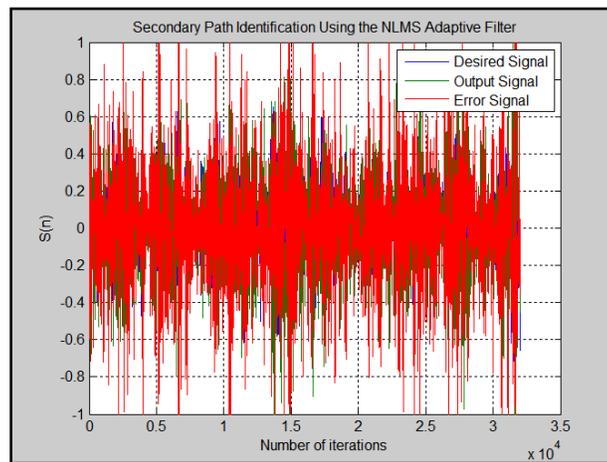
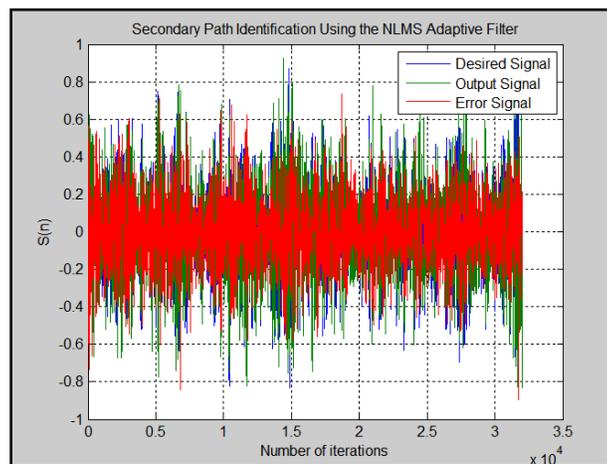


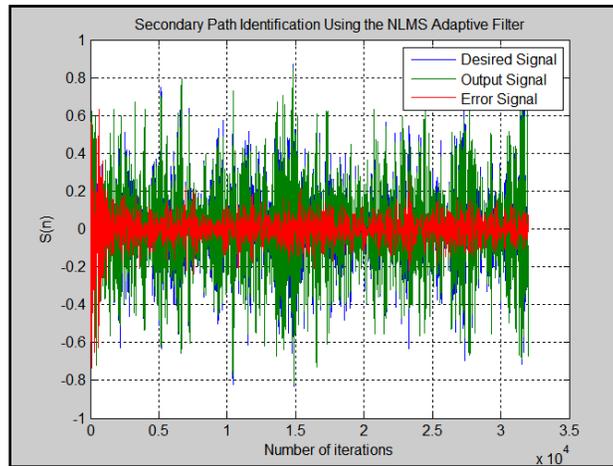
Figura 32. Identificación del camino secundario mediante el filtro adaptativo LMS normalizado para (a) 90 coeficientes. (b) 270 coeficientes. (c) 450 coeficientes. (d) 750 coeficientes.



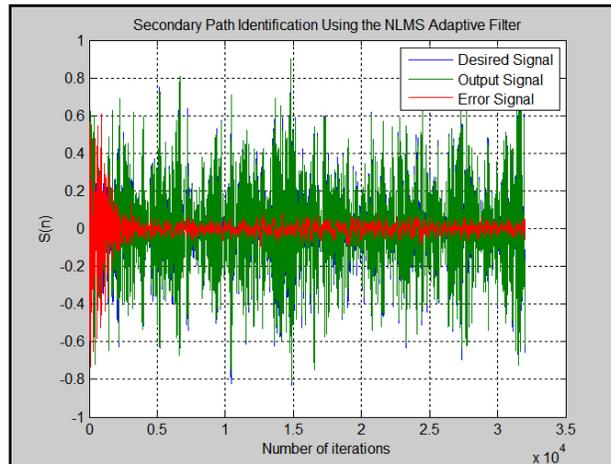
(a)



(b)



(c)



(d)

Como se observa en la figura 32 el camino secundario es representado correctamente (error mínimo) con un filtro de **750** coeficientes lo que demuestra la complejidad geométrica del recinto.

Con el objetivo de disminuir este número de coeficientes, se diseña un filtro FIR pasa-banda con las frecuencias de corte sobre las que se limita el sistema CAR. Éste filtra la señal $u(n)$ y $d(n)$, reduciendo la cantidad de información y así mismo la carga al algoritmo LMS, haciendo posible representar efectivamente el camino secundario con menos coeficientes. La figura 33 muestra el filtro diseñado.

En la figura 34 se presentan los resultados obtenidos implementando el filtro limitador.

Figura 33. Filtro limitador de ancho de banda (50 – 230 Hz), para una frecuencia de muestreo de 8000 Hz. Orden= 675.

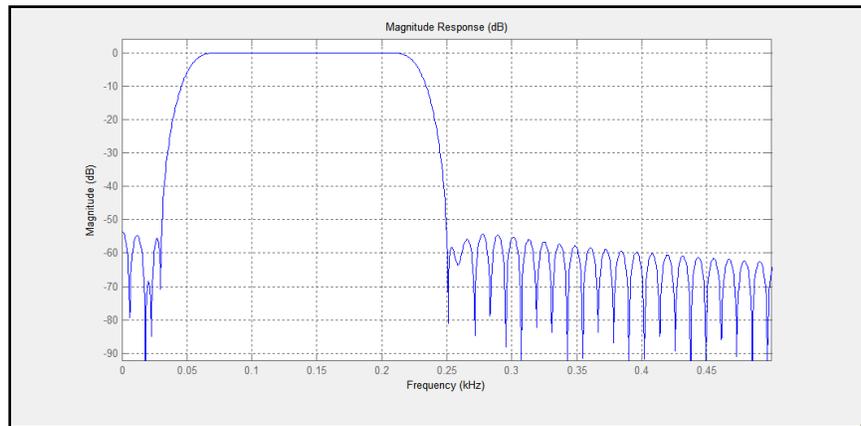
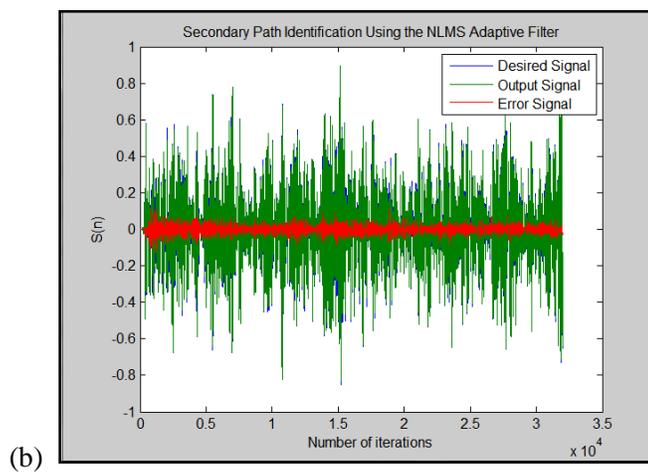
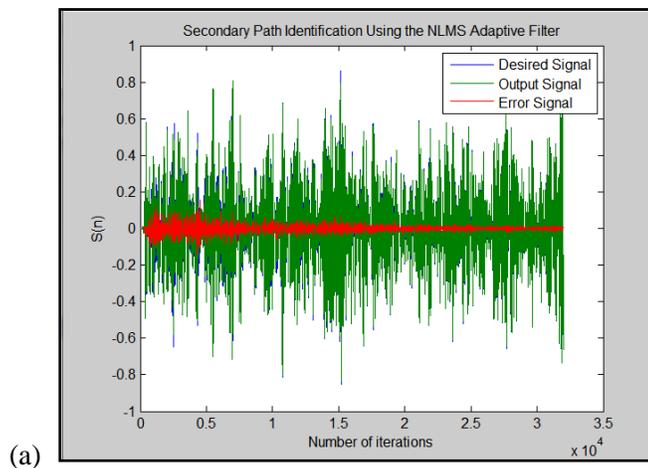


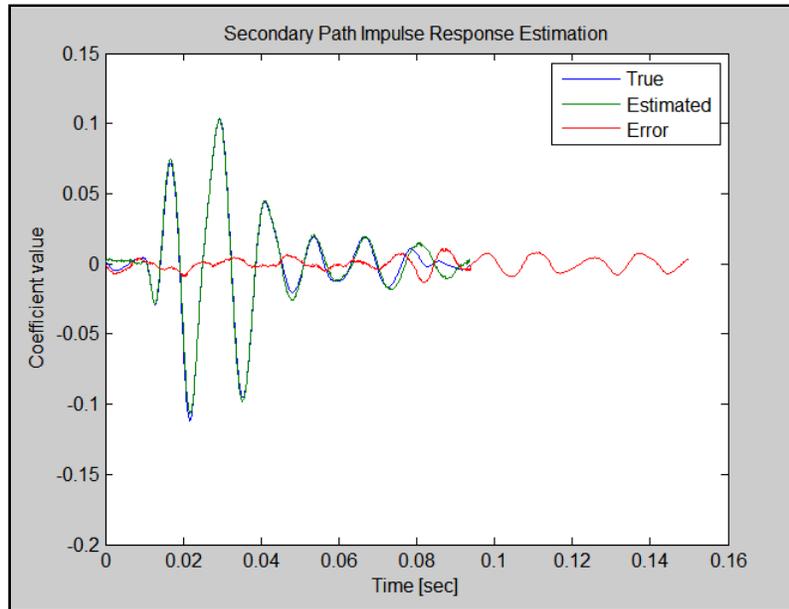
Figura 34. Identificación del camino secundario utilizando filtro limitador de ancho de banda, para (a) 750 coeficientes. (b) 350 coeficientes.



Con el uso del filtro limitador se reduce el número de coeficientes necesarios a **350**, sin incrementar el error de identificación.

Para observar la exactitud del camino secundario estimado, se compara la respuesta al impulso estimada, formada a partir de los coeficientes obtenidos (*Coeffs_S*), con la respuesta al impulso real $h_s(t)$, deducida mediante de-convolución, en *Adobe Audition*. Como se muestra en la figura 35.

Figura 35. Respuesta al impulso del camino secundario: real (azul), estimada (verde), error de estimación (rojo).



Como se observa, la respuesta al impulso se estima correctamente en los primeros 0.1ms. Sólo el final de ésta no es estimado con exactitud. Estos errores en la estimación sólo afectan débilmente el desempeño del algoritmo adaptativo de control, en su tarea de optimizar los pesos del filtro para minimizar el ruido,⁴⁵ causando que al algoritmo le tome un poco más de tiempo alcanzar el valor óptimo, por lo que se consideran irrelevantes. En el Anexo F se presenta el código elaborado en *Matlab* para la estimación el camino secundario.

Cuando estos coeficientes son implementados en un filtro FIR fijo, corresponden a la función de transferencia del camino secundario.

5.6.2 Análisis del camino secundario

El camino secundario representa los cambios de fase y amplitud que ocurren entre el controlador (tarjeta DSP) y el micrófono de error, además determina el desempeño del sistema CAR en las distintas bandas de frecuencia. Es analizado mediante el comando *fvtool* de *Matlab* que permite conocer el comportamiento en magnitud y fase de filtros IIR y FIR programados. Para esto, los

⁴⁵ *Ibid.*, p. 45.

coeficientes que representan el camino secundario deben ser extraídos del filtro adaptativo programado para estimar el camino secundario. Esta tarea se realiza por medio del siguiente código:

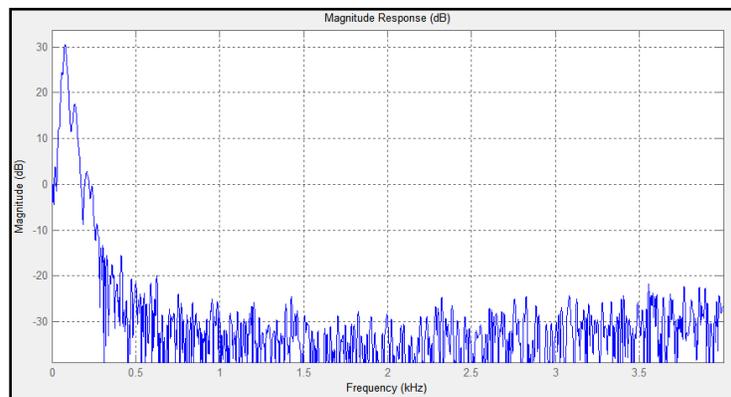
```
coeffs_S = h_S.Coefficients;
```

Donde, “h_S”, representa el filtro FIR adaptativo mediante algoritmo LMS, y el comando “.Coefficients”, corresponde a la orden de extraer los coeficientes de “h_S”, que son almacenados en el vector “coeffs_S”. Estos coeficientes se analizan como un filtro FIR fijo de orden N-1, mediante el siguiente código:

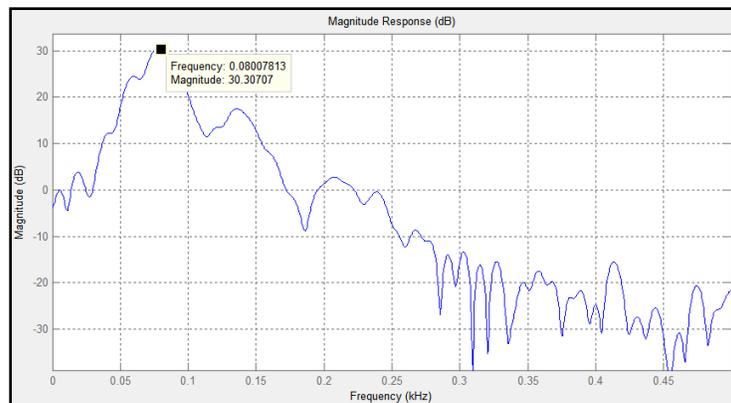
```
fvtool(coeffs_S)
```

La respuesta en magnitud del camino secundario se muestra en la figura 36.

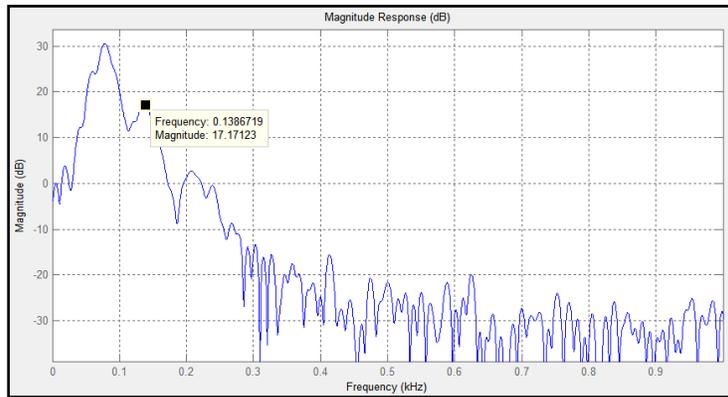
Figura 36. (a) Respuesta en frecuencia del camino secundario estimado con 750 coeficientes, sin limitación del ancho de banda. (b) Primera resonancia (80 Hz). (c) Segunda resonancia (135 Hz).



(a)



(b)



(c)

El análisis muestra que el camino secundario tiene dos resonancias principales, en **80 y 135 Hz**. Estas pueden deberse a los modos de vibración del recinto, presentes en la ubicación de la fuente de control o del micrófono de error. El número de resonancias está relacionado inversamente con la estabilidad del sistema; en estas frecuencias la señal de entrada tiende a volverse inestable, reduciendo el desempeño del CAR.

5.6.3 Simulación sistema CAR adaptativo

En esta sección se modela el sistema CAR diseñado con el fin de determinar la configuración más adecuada para los algoritmos LMS y Fx-LMS, observando el comportamiento del sistema según la fuente de ruido a tratar y las funciones de transferencia acústica (camino primario) y electroacústica (camino secundario).

Para realizar esta simulación, son necesarios los siguientes datos:

- Señal de referencia (en la posición del micrófono de referencia).
- Señal de error (en la posición del micrófono de error).
- Retardo del camino primario (tiempo entre micrófono de referencia y micrófono de error).
- Retardo del camino secundario (tiempo entre la fuente secundaria y el micrófono de error).
- Función de transferencia estimada del camino secundario. (deducida en la sección 5.6.1).

5.6.3.1 Medición señal de referencia y error

El primer paso consiste en obtener la señal de ruido a minimizar, señal de error $e(t)$, y la señal de referencia $x(t)$. Para esto, se deben escoger las posiciones de los micrófonos de referencia y error, teniendo en cuenta que determinan algunos componentes claves en el funcionamiento del sistema CAR:

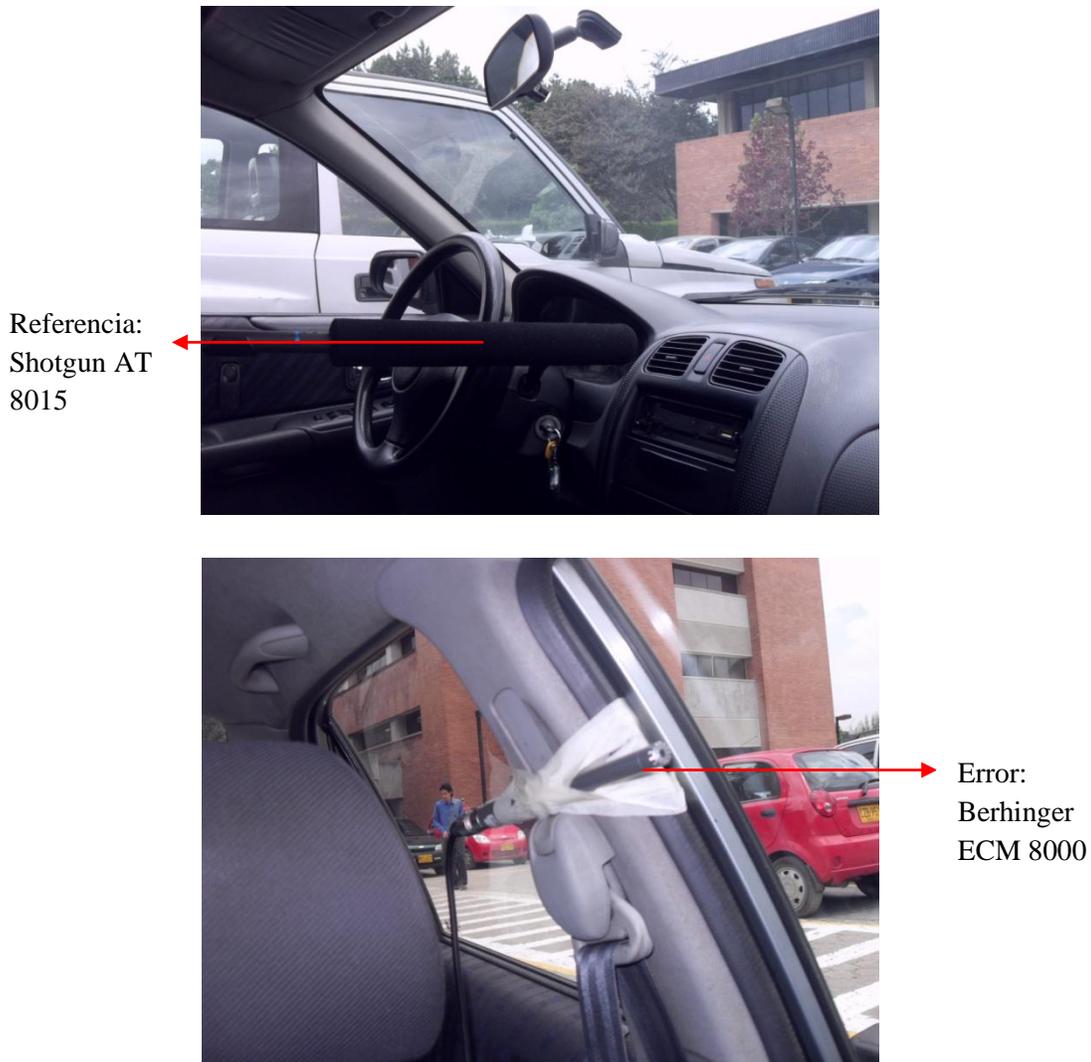
- La distancia entre el micrófono de referencia y el micrófono de error (retardos del camino primario), determina el tiempo máximo con el que dispone el sistema CAR para generar la

señal de alimentación a la fuente secundaria, esto para que se cumpla la ley de causalidad.⁴⁶ Por otro lado, la señal de referencia se debe obtener lo más cerca posible a la fuente de ruido.

- La posición del micrófono de error determina la ubicación de la zona de atenuación (radio de 1/10 de la longitud de onda). Para 230 Hz, ésta será de 15cm de radio, lo que corresponde a la distancia interaural. Por esta razón, el micrófono deberá ir lo mas cerca posible a la cabeza del conductor, de otro modo la zona de atenuación generada no alcanzaría a abarcar el espacio sonoro de éste.

Según estos criterios, se escoge la posición de ambos micrófonos, como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Ubicación micrófono de referencia y error en la cabina.



⁴⁶ COBO PARRA, Fundamentos del Control Activo del Ruido. Op cit., p. 92.

La señal de ruido se captura en ambos micrófonos, *Behringer ECM8000* (señal de error) y *Shotgun AT8015* (señal de referencia); se almacena por medio de la interfaz *M-audio, Fast Track Ultra* y se muestrea a 96 KHz, la elección de esta frecuencia es debido a que la interfaz utilizada no permite muestrear a 8 KHz (frecuencia mínima de muestreo del DSP), por lo que se busca un múltiplo para obtener una representación fiel de la señal real después de la interpolación.

En las figuras 38 y 39 se muestran las señales obtenidas y su espectro, respectivamente.

Figura 38. Gráfico de amplitud Vs. tiempo: Señal de referencia (Gráfica superior), señal de error (Gráfica inferior).

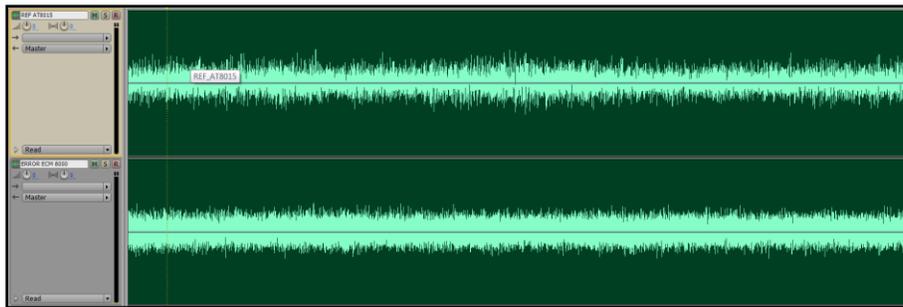
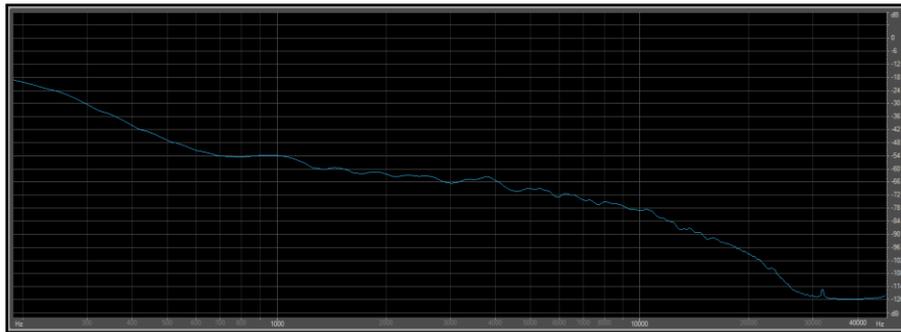
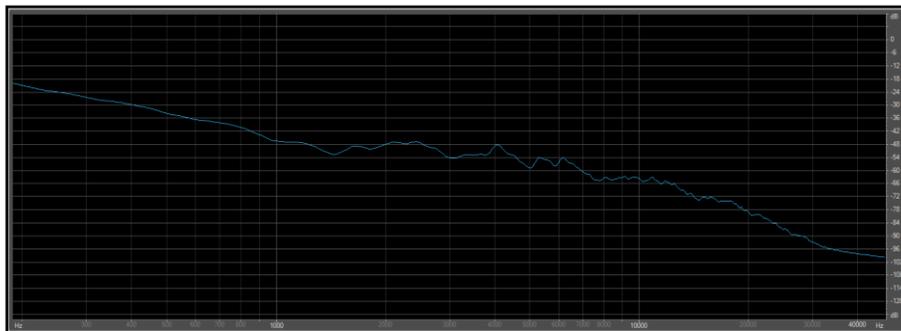


Figura 39. Análisis en frecuencia: (a) Señal de referencia, (b) señal de error.



(a)



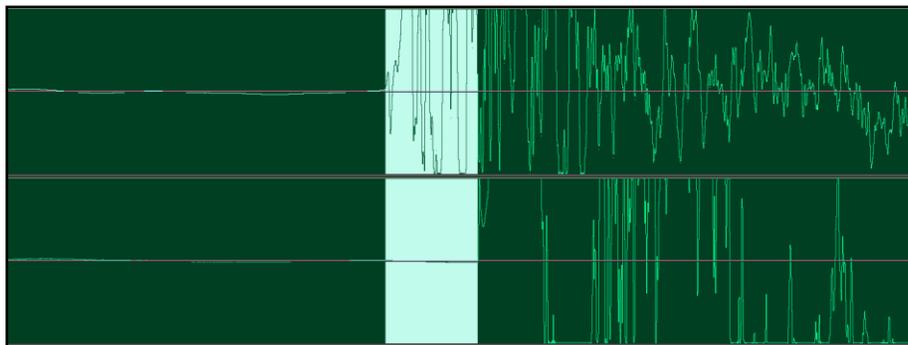
(b)

Como se observa, las señales capturadas por ambos micrófonos no son iguales, debido a la geometría del recinto (modos normales, materiales), la no linealidad de los transductores y la distancia de estos respecto a la fuente de ruido. Sin embargo, el análisis en frecuencia sugiere que ambas señales están correlacionadas, lo cual favorece el sistema de control de ruido.⁴⁷

5.6.3.2 Medición retardos camino primario y secundario

Los retardos acústicos de estos dos caminos son determinados mediante fuentes impulsivas (bombas R-12). Para el camino primario se ubican los micrófonos de error y referencia en la posición mostrada en la figura 37, y la fuente impulsiva en la posición del micrófono de referencia. De esta manera, el impulso es capturado por ambos micrófonos y almacenado utilizando *Adobe Audition*, programa mediante el cual se determina la diferencia de tiempo entre la llegada del impulso a cada uno de los micrófonos, como se muestra en la figura 40.

Figura 40. Retardo temporal entre el micrófono de referencia (gráfica superior) y el micrófono de error (gráfica inferior).



El retardo acústico del camino primario es de **1 milisegundo**, en este tiempo el controlador debe generar la señal de alimentación hacia el altavoz secundario $y(t)$, para cumplir con el principio de causalidad, este es irrelevante en ruidos periódicos, pero de especial importancia en ruidos aleatorios⁴⁸

Para medir el retardo acústico del camino secundario, se ubica la fuente de control en la posición donde se mide este (Ver Anexo E). Se ubica un micrófono al lado de la fuente de control y se graba el impulso en éste último, y en el micrófono de error. El resultado obtenido se muestra en la figura 41.

El retardo acústico del camino secundario es de **2 milisegundos**, la distancia existente entre este camino produce un cambio de fase entre la señal de control $y(t)$ y la señal a minimizar $e(t)$. Cuando el desfase alcanza los 180 grados, la señal de control interfiere positivamente con la señal a minimizar y se produce un incremento en la presión sonora, haciendo que el sistema se torne

⁴⁷ HANSEN, Foundations of Active Control. Op cit., p. 27.

⁴⁸ Ibid., p. 27

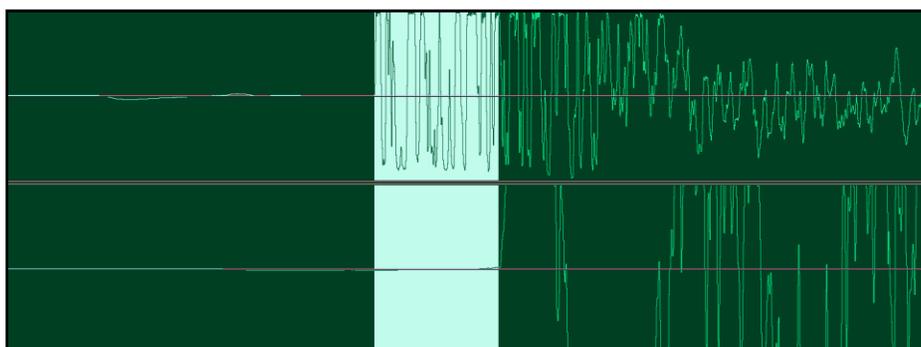
inestable.⁴⁹ Esto sucederá para 250 Hz y sus múltiplos impares, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f(n) = (2n + 1) \frac{1}{2t} \quad (19)$$

Donde, n es un número que determina el armónico y t el retardo del camino secundario en segundos.

Para evitar problemas de estabilidad, este retardo acústico es compensado previamente en el algoritmo de control, de manera electrónica.

Figura 41. Retardo temporal entre el micrófono sucesivo a la fuente secundaria (gráfica superior) y el micrófono de error (gráfica inferior).



5.6.3.3 Modelación en *Simulink*

En este capítulo se valida el sistema de control diseñado, mediante el uso del programa *MATLAB/Simulink* de *MathWorks*; se escoge éste debido a que presenta las siguientes ventajas en cuanto a simulación⁵⁰:

- Es un entorno muy utilizado y fácil de obtener.
- Permite de forma simple, conjuntar circuitos y control en la misma simulación
- Es posible aproximar el sistema simulado al sistema real, incorporando algunas no linealidades y la discretización temporal consecuencia de un empleo de control digital.
- Las simulaciones se realizan en un tiempo relativamente corto (entre algunos segundos y pocos minutos).
- Permite generar código compatible con la tarjeta DSP a utilizar.

⁴⁹ COBO PARRA, Fundamentos del Control Activo del Ruido. Op cit., p. 96.

⁵⁰ ANEXO E: MODELOS EN MATLAB/SIMULINK. En:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2696/6/36106-6.pdf>

Además de esto, el programa incorpora librerías, con filtros FIR adaptativos y algoritmos adaptativos (LMS, NLMS), previamente programados. Facilitando implementaciones de sistemas de control activo.

El proceso de simulación tiene como finalidad conocer el comportamiento del sistema de la manera mas cercana a la realidad; para esto se tiene en cuenta tanto la parte acústica del sistema (representada por el camino primario y secundario) como la parte electrónica (representada por el sistema de control y la compensación del camino secundario de forma electrónica).

Se implementa el sistema por medio de un diagrama de bloques que permite, por medio de interruptores, variar algunos parámetros de configuración; de esta manera se observa como estos interfieren en el comportamiento del sistema, afectando sus resultados y estabilidad. En la figura 42 se muestra el modelo del sistema CAR. En las tablas 2 y 3 se detallan los componentes del mismo y su funcionalidad.

Tabla 2. Componentes del sistema CAR modelado.

COMPONENTES DEL SISTEMA		
Nombre	Características	Color
Señal Deseada	Señal capturada por el micrófono <i>ECM8000</i> (sección 5.6.3.1), re muestreada a 8000 Hz. Duración: 85 seg.	Azul
Señal Referencia	Señal capturada por el micrófono <i>AT8015</i> (sección 5.6.3.1), re muestreada a 8000 Hz. Duración: 85 seg.	Rojo
FIR BP	Filtro limitador del ancho de banda (50-230Hz). Orden:675.	Negro
Unbuffer	Convierte un arreglo vectorial en una salida escalar.	Azul, Rojo
Tono Puro	Muestras de una onda sinusoidal de 100 Hz. Con $F_s = 8000$ Hz.	Negro
Delay FP	Retardo acústico del camino primario en muestras.	Azul
Delay SP	Retardo acústico del camino secundario en muestras.	Verde
$H(t)$ SP	Función de transferencia (electro- acústica) estimada del camino secundario.	Verde
Coef. SP	Coefficientes estimados del camino secundario (<i>.mat</i>).	Verde
Algoritmo Fx-LMS	Algoritmo adaptativo Fx-LMS, cuya entrada es la señal de referencia filtrada por el camino secundario $R(n)$.	Negro
Filtro Adaptativo FIR	Filtra la señal $x(n)$ según los coeficientes generados por el algoritmo Fx-LMS. Produciendo la señal de atenuación $y(n)$.	Negro
Deseada	Almacena en un Archivo de audio (<i>.wav</i>), la señal deseada $x(n)$.	Azul
Salida	Almacena en un Archivo de audio (<i>.wav</i>), la señal de salida $y(n)$.	Negro
Error	Almacena en un Archivo de audio (<i>.wav</i>), la señal de error $e(n)$.	Rojo

Como se observa en la figura 42, los bloques de color verde: *delay SP*, *H (t) SP* y *Coef. SP* están duplicados; esto se debe a que representan la función de transferencia del camino secundario estimado (bloques denotados con apostrofo) y la función de transferencia del camino secundario real (sin apostrofo). Para efectos de la simulación, ambas tienen los mismos valores, pero en un caso real estos difieren dependiendo del error de estimación. La función de transferencia estimada es usada para compensar electrónicamente la función de transferencia real, la cual tiene lugar en el dominio electro- acústico del sistema.

Figura 42. Sistema CAR modelado en *Simulink*.

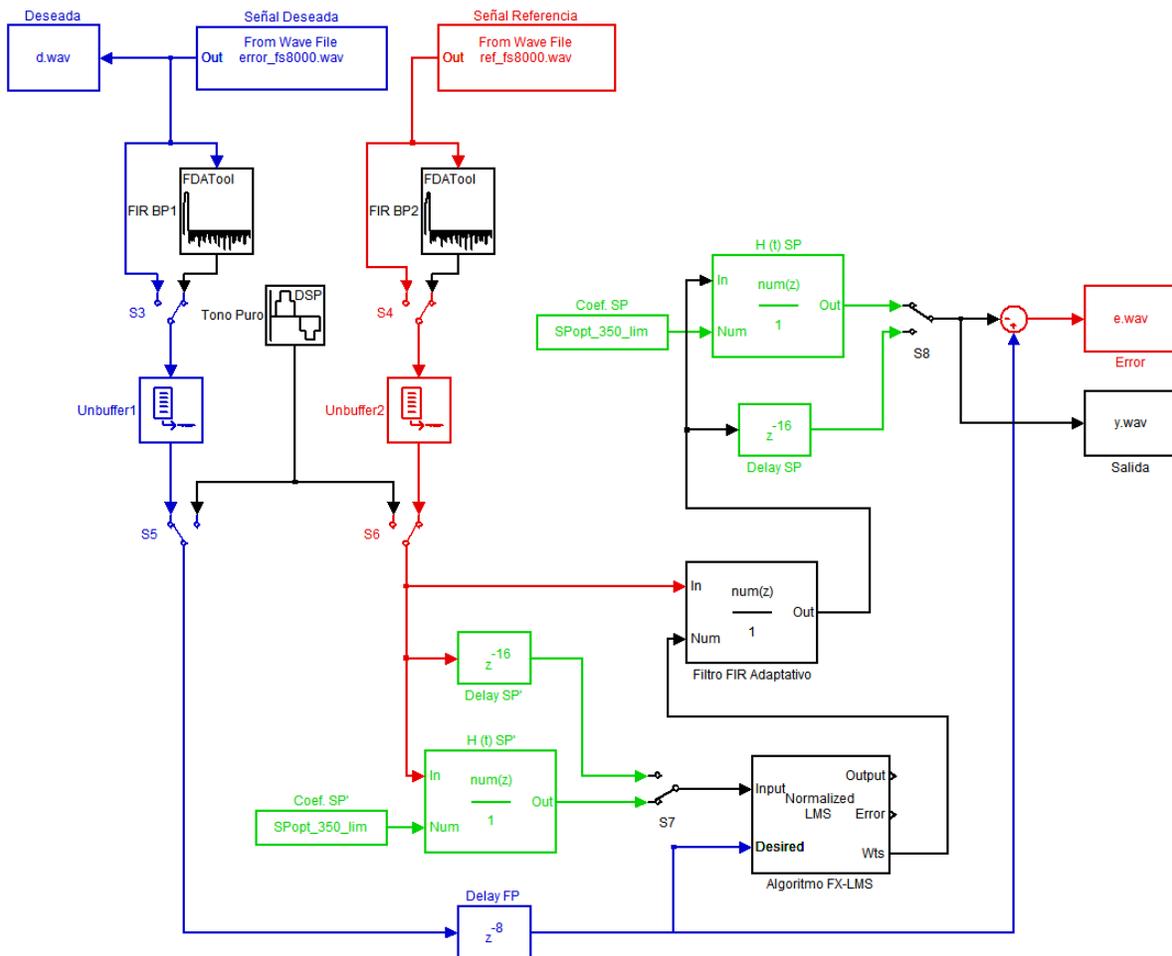


Tabla 3. Interruptores utilizados para variar los parámetros de configuración.

INTERRUPTORES		
Nombre	Función	Color
S3	Seleccionar si se limita el ancho de banda de la señal deseada	Azul
S4	Seleccionar si se limita el ancho de banda de la señal de referencia	Rojo
S5	Seleccionar si se utiliza un tono puro de 100 Hz como señal deseada	Azul
S6	Seleccionar si se utiliza un tono puro de 100 Hz como señal de referencia	Rojo
S7	Seleccionar si se filtra la señal de referencia $x(n)$ con el retardo acústico del camino secundario o con la función de transferencia estimada	Negro
S8	Seleccionar si se filtra la señal de atenuación $y(n)$ con el retardo acústico del camino secundario o con la función de transferencia real	Verde

5.6.3.4 Organización de pruebas

En este punto, se presentan las simulaciones del sistema adaptativo, donde se varían diversos parámetros para cada caso de simulación. Se realizan 9 pruebas en las cuales se aumenta progresivamente la complejidad del sistema, partiendo de una configuración ideal (señal de ruido y medio de propagación ideal), hasta acercarse al comportamiento real del mismo; obteniendo distintos resultados de atenuación. En la tabla 4 se muestran las configuraciones escogidas para cada prueba.

Tabla 4. Pruebas sistema CAR adaptativo modelado.

N° de Prueba	Señales de Entrada (Error y Referencia)	Filtro Limitador	$H(t)$ Camino Secundario
1 a	Tono Puro (100 Hz)	No	No
1 b	Tono Puro (100 Hz)	No	16 muestras
1 c	Tono Puro (100 Hz)	No	750 coeficientes
2 a	Ruido A/C	No	No
2 b	Ruido A/C	No	16 muestras
2 c	Ruido A/C	No	450 coeficientes
2 d	Ruido A/C	No	750 coeficientes
3 a	Ruido A/C	50 - 230 Hz	16 muestras
3 b	Ruido A/C	50 - 230 Hz	350 coeficientes

La frecuencia de muestreo tomada como base para la simulación es 8000 Hz, siendo ésta la frecuencia mínima de muestreo de la tarjeta DSP TMS320C6713.

Por lo tanto, los retardos del camino primario y secundario, medidos en la sección 5.6.3.2, son representados en el modelo con *delays* de 8 muestras (1ms) y 16 muestras (2ms) respectivamente.

Estos retardos no representan la función de transferencia total sino únicamente el cambio de fase que ocurre en una señal, debido a la distancia entre los componentes del sistema. Para tener en cuenta los demás efectos de la función de transferencia, se utiliza la función de transferencia estimada, representada por un filtro FIR fijo.

El número de coeficientes escogido para representar la función de transferencia del camino secundario en el modelo es escogido según los criterios de la sección 5.6.1.

Los objetivos de realizar cada prueba se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Objetivos de las pruebas de simulación.

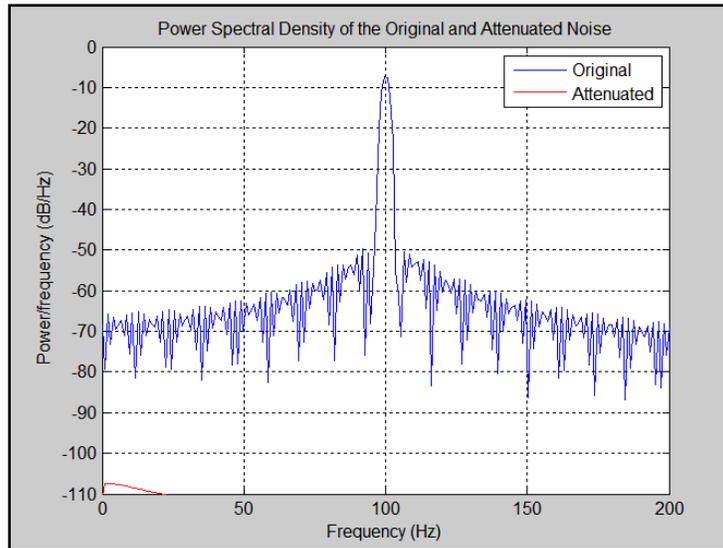
Prueba	Objetivo	Resultados esperados
1	Observar el comportamiento del sistema para un tono puro e invariante en el tiempo, según la complejidad de la función de transferencia del camino secundario. a) Sin función de transferencia, b) Retardo de 2ms en la función de transferencia, c) Función de transferencia estimada con 750 coeficientes.	Se espera obtener una atenuación importante, que disminuye según la función de transferencia se hace mas compleja.
2	Observar el comportamiento del sistema para las señales reales de ruido, según la complejidad de la función de transferencia del camino secundario. a) Sin función de transferencia, b) Retardo de 2ms en la función de transferencia, d) Función de transferencia estimada con 450 coeficientes. e) Función de transferencia estimada con 750 coeficientes.	Se espera obtener una atenuación menor que en la prueba 1, al tratarse de una señal aleatoria de banda ancha. Esta disminuirá según la función de transferencia se hace más compleja.
3	Determinar la eficiencia de limitar el ancho de banda de funcionamiento del sistema.	Se espera una mayor capacidad de adaptación del algoritmo debido a la menor influencia de alta frecuencia, así mismo un aumento en la atenuación obtenida.

5.6.3.5 Resultados simulación

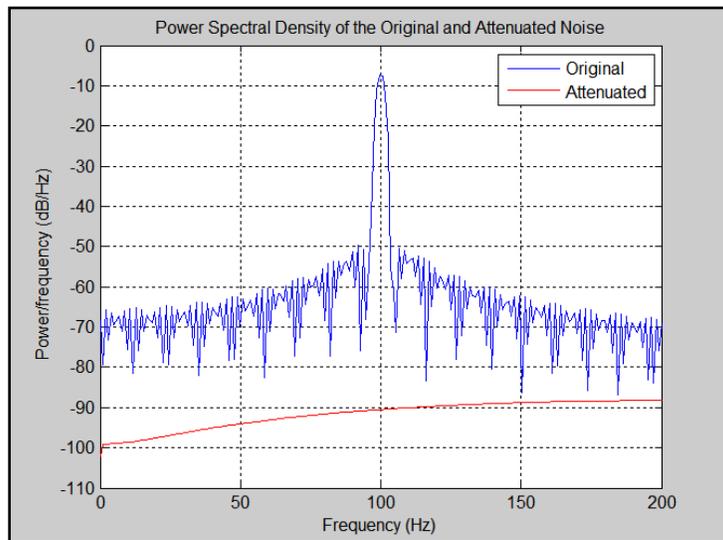
En este punto, se presentan los resultados obtenidos de la modelación del sistema para las 9 pruebas propuestas en forma de gráficas de respuesta en frecuencia, comparando el nivel de ruido emitido (original) con el nivel de ruido residual (atenuado), para 85 segundos de simulación.

1. Simulación con tono puro

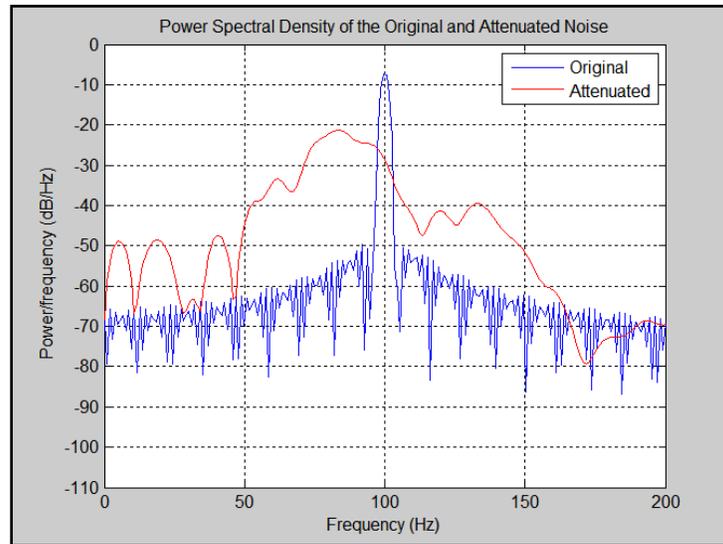
Figura 43. Respuesta del sistema CAR modelado para un tono puro de 100 Hz. (a) Sin función de transferencia del camino secundario. (b) Con retardo del camino secundario (2 ms). (c) Con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).



(a)



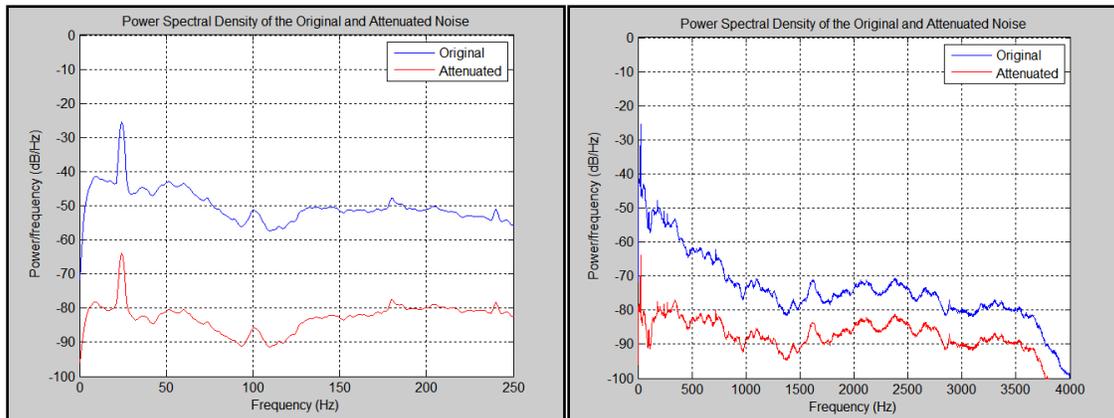
(b)



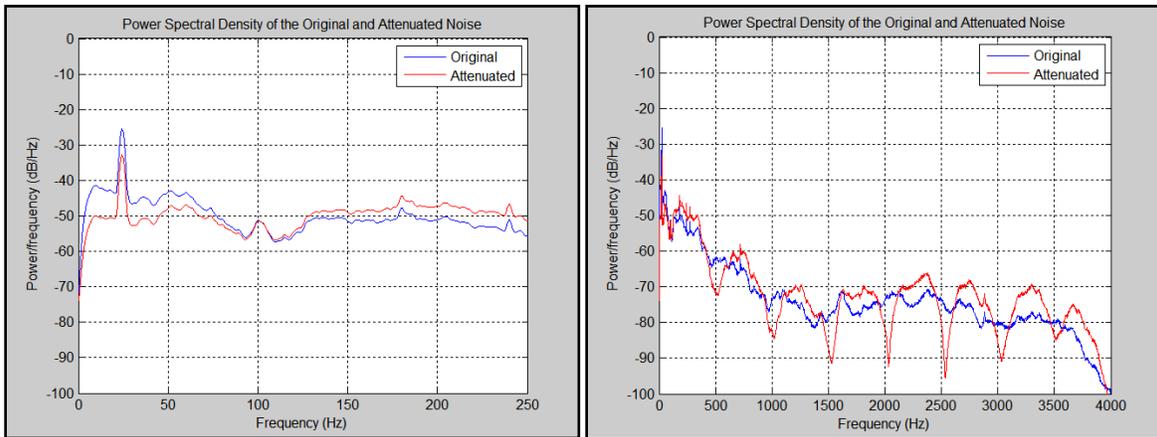
(c)

2. Simulación con señales de ruido A/C

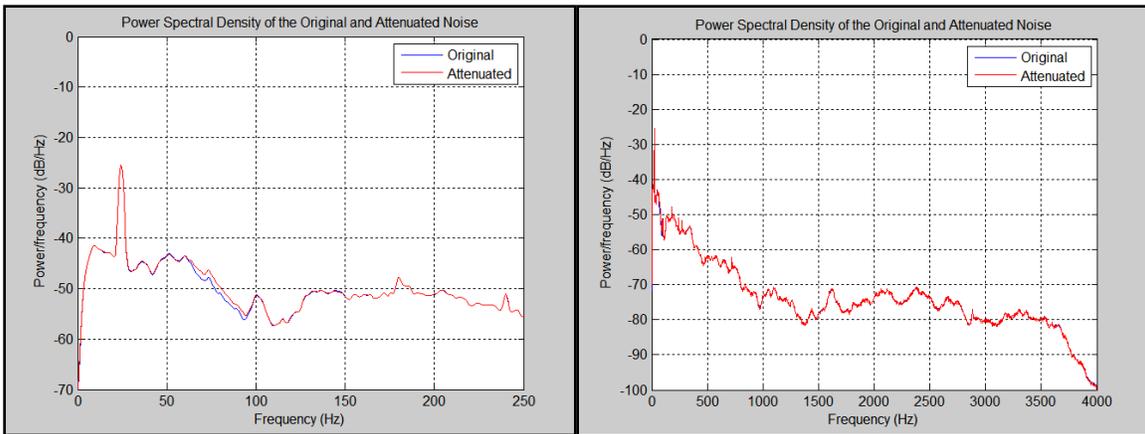
Figura 44. Respuesta del sistema CAR modelado para señales de ruido A/C. (a) Sin función de transferencia del camino secundario. (b) Con retardo del camino secundario (2 ms). (c) Con función de transferencia del camino secundario estimada (450 coeficientes). (d) Con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).



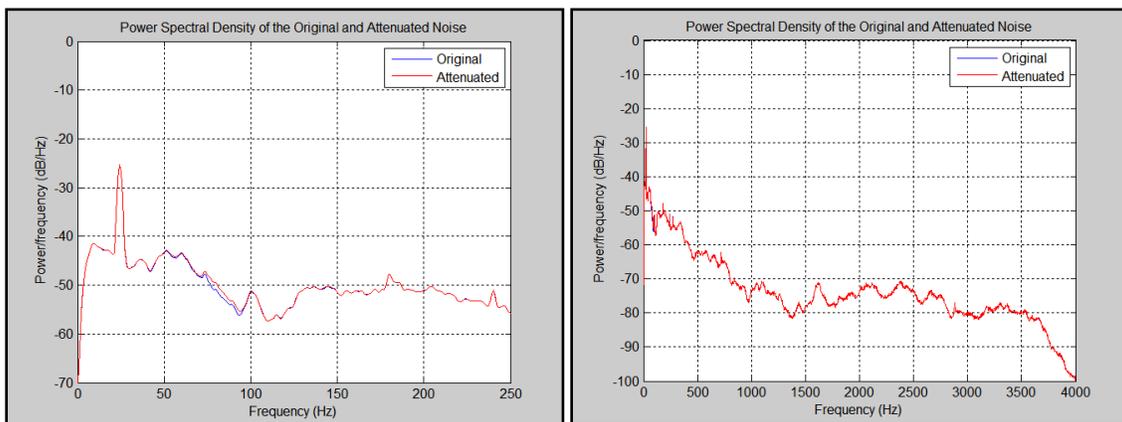
(a)



(b)



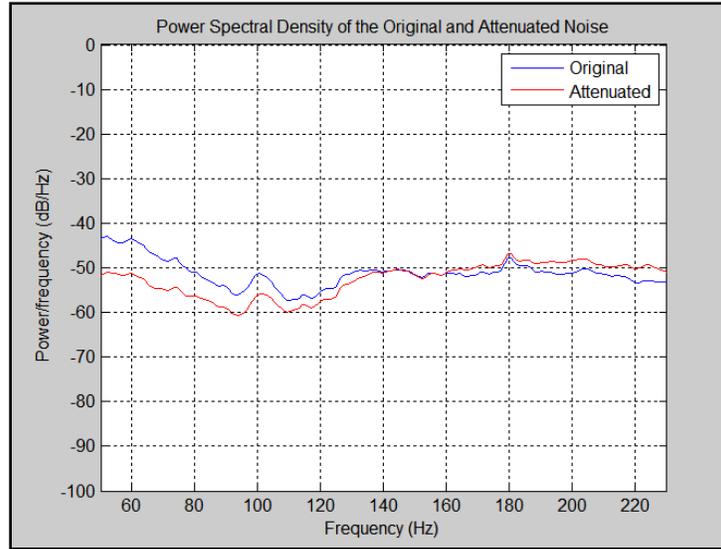
(c)



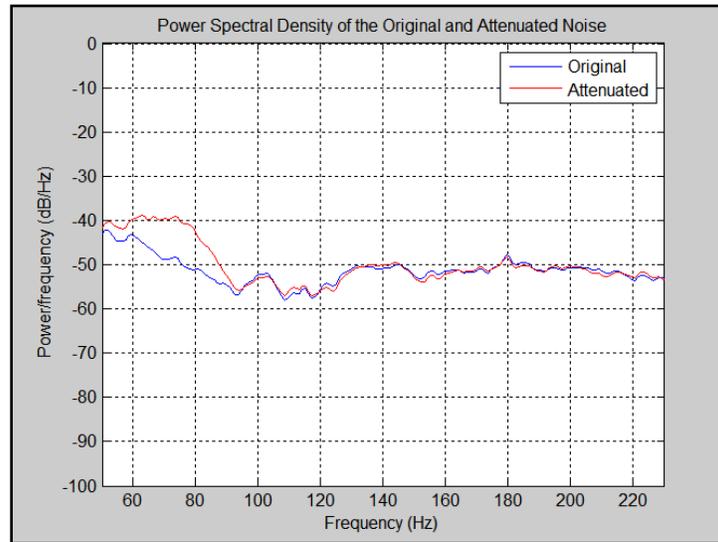
(d)

3. Simulación con filtro limitador de ancho de banda

Figura 45. Respuesta del sistema CAR modelado para señales de ruido A/C con limitación de ancho de banda, (a) Con retardo del camino secundario (2 ms). (b) Con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).



(a)



(b)

5.6.3.6 Resumen de resultados

En la tabla 6 se presenta la atenuación de ruido alcanzada para las pruebas realizadas (hasta 4 KHz), al igual que la configuración del algoritmo adaptativo utilizada para obtener estos resultados.

Tabla 6. Resultados globales del sistema CAR modelado y configuración del algoritmo adaptativo para las 9 pruebas realizadas.

N° de Prueba	CONFIGURACIÓN ALGORITMO ADAPTATIVO			ATENUACIÓN (dB)
	Filter Length	Step Size	Leakage	
1 a	512	0.4	1	300.52*
1 b	512	0.4	1	293.17*
1 c	512	0.4	1	270.85*
2 a	512	0.8	0.995	29.62
2 b	1024	1.2	0.7775	3.06
2 c	1024	1.2	0.7775	-0.02
2 d	1024	1.2	0.7775	-0.03
3 a	1024	1.2	0.995	9.18
3 b	1024	1.2	0.9995	5.02

* Los altos valores de atenuación obtenidos para la prueba 1 a b y c, son debidos a que en esta se utiliza como señal de ruido un tono puro de 100 Hz, en lugar del ruido producido por el sistema de ventilación. Como se muestra en la tabla 4.

La configuración del algoritmo adaptativo se escoge empíricamente hasta obtener los mejores resultados posibles. Como se observa en la tabla 6, se necesita de un algoritmo más complejo a medida que incrementa la complejidad del sistema, la longitud del filtro es el doble para el ruido A/C que para un tono puro, un factor de pérdida (leakage menor a 1) debe ser introducido para asegurar la convergencia del filtro a un resultado, así mismo el *step size* se incrementa debido a la necesidad de una convergencia mas rápida del algoritmo para procesar ruido aleatorio.

La atenuación disminuye a medida que el sistema se hace más complejo, llegando a ser nula en las pruebas 2 c y d y aumentando al introducirse el filtro limitador del ancho de banda.

Las pruebas 2 y 3 son las que representan más acertadamente el comportamiento real del sistema, por lo que son validadas en la implementación real.

5.7 IMPLEMENTACIÓN SISTEMA CAR ADAPTATIVO

El sistema CAR adaptativo se implementa en el interior del vehículo mediante el montaje que se presenta en la figura 46. En la figura 47 se presenta el flujo de señal del sistema *feedforward*.

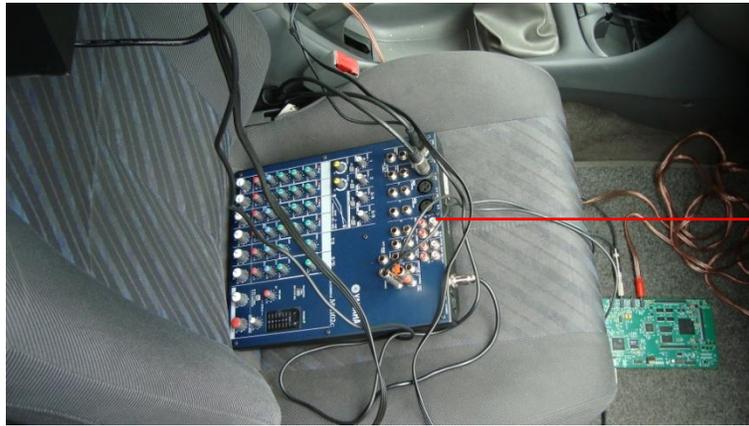
Figura 46. Implementación del sistema CAR.



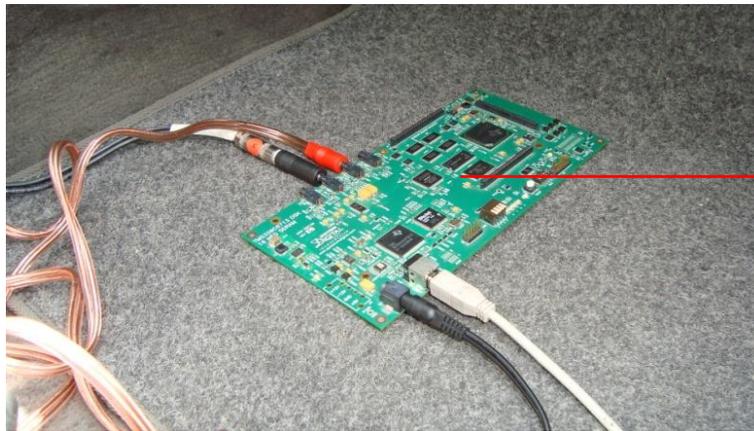
Referencia:
Shotgun AT
8015



Mic error:
Berhinger
ECM 8000



Consola:
Yamaha
MG102C



DSP: Texas
Instruments
TMS320C67



Fuente
Secundaria:
Subwoofer
GD580

Amplificador:
Creative GD580

La señal de referencia $x(t)$ es capturada por el micrófono *Shotgun AT8015* y la señal de error $e(t)$ por el micrófono *Berhinger ECM8000*, ambas son pre amplificadas mediante la consola *Yamaha MG102C*. Se conectan a la tarjeta DSP *TMS320C6713* por medio de la entrada de línea estéreo, la salida producida por ésta es amplificada mediante el amplificador *Creative GD580* para alimentar el altavoz secundario *subwoofer GD580* que reproduce la señal de control y (t) .

En la tarjeta DSP se implementan 6 diferentes algoritmos de control, los cuales fueron simulados previamente en las pruebas 2 y 3 (sección 5.6.3.4). En la tabla 7 se presentan las características de estos.

Figura 47. Flujo de señal del sistema CAR adaptativo implementado al interior del vehículo. Las líneas rojas representan los caminos acústicos: primario (FP) y secundario (SP).

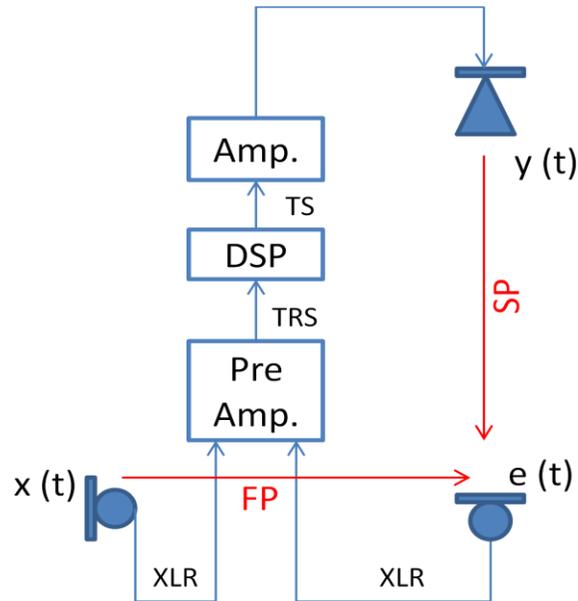


Tabla 7. Características de los algoritmos adaptativos implementados en la tarjeta DSP.

ALGORITMO	CARACTERÍSTICAS	
	Filtro Limitador	$H(t)$ Camino Secundario
LMS	No	No
FX-LMS Delays	No	16 muestras
FX-LMS 450	No	450 coeficientes
FX-LMS 750	No	750 coeficientes
FX-LMS Lim. Delays	50 - 230 Hz	16 muestras
FX-LMS Lim. 350	50 - 230 Hz	350 coeficientes

5.7.1 Programación de algoritmos LMS y Fx-LMS

Los algoritmos se programan en *MATLAB/Simulink*, y son transferidos a la tarjeta DSP mediante el programa *Code Composer Studio*, encargado de traducir el código *C* generado en *Simulink*. En las figuras: 48 a 53, se presenta la programación de los algoritmos utilizados.

Figura 48. Algoritmo LMS.

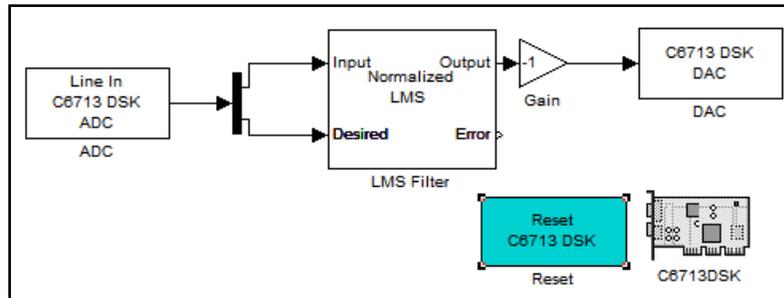


Figura 49. Algoritmo Fx-LMS, con retardo del camino secundario (2ms).

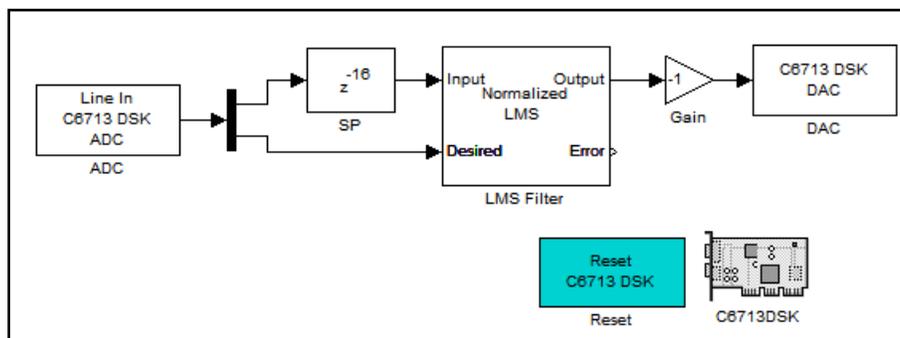


Figura 50. Algoritmo Fx-LMS, con función de transferencia del camino secundario estimada (450 coeficientes).

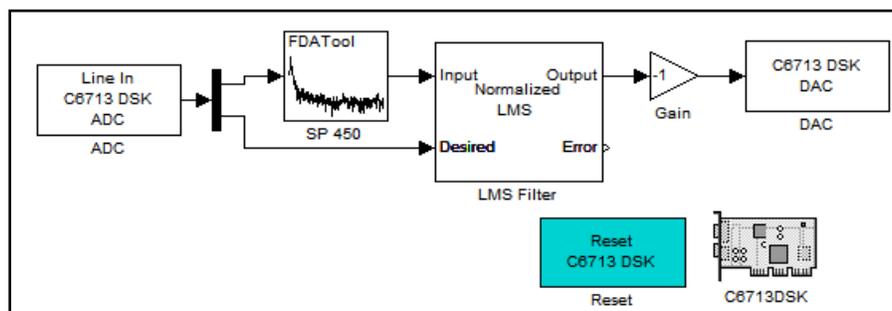


Figura 51. Algoritmo Fx-LMS, con función de transferencia del camino secundario estimada (750 coeficientes).

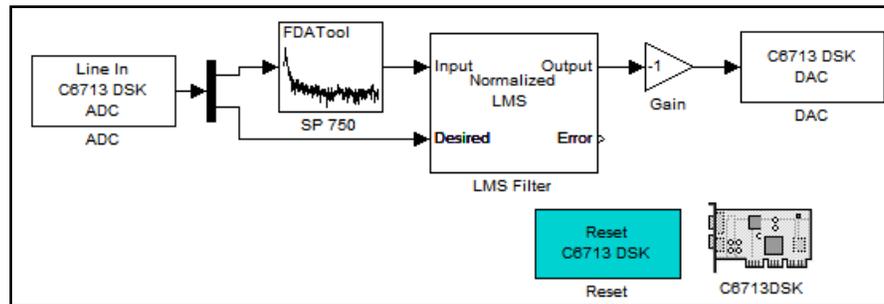


Figura 52. Algoritmo Fx-LMS, con limitación de ancho de banda y retardo del camino secundario (2ms).

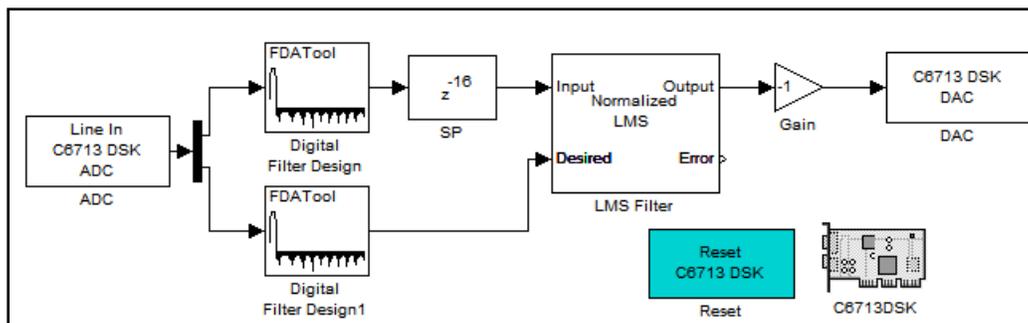
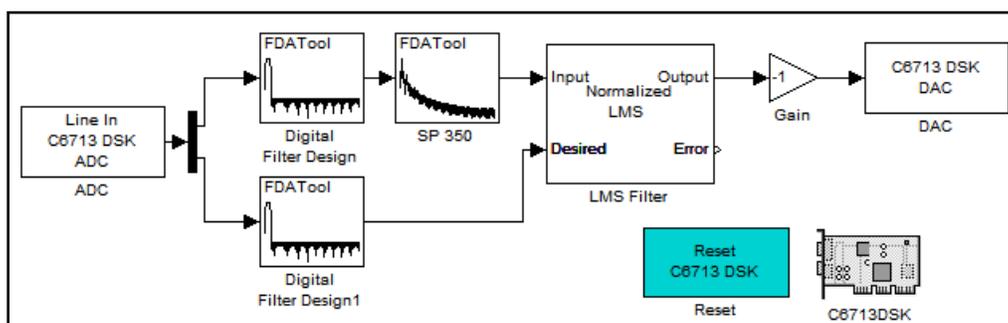


Figura 53. Algoritmo Fx-LMS, con limitación de ancho de banda y función de transferencia del camino secundario estimada (350 coeficientes).



Se utiliza el bloque *LMS Filter* para generar la señal de control, el cual contiene tanto el algoritmo (*Normalized LMS*) como el filtro adaptativo (FIR). La configuración interna de este bloque es

equivalente a la utilizada para configurar el algoritmo adaptativo en la simulación del sistema (sección 5.6.3.6). Se presenta en la tabla 8.

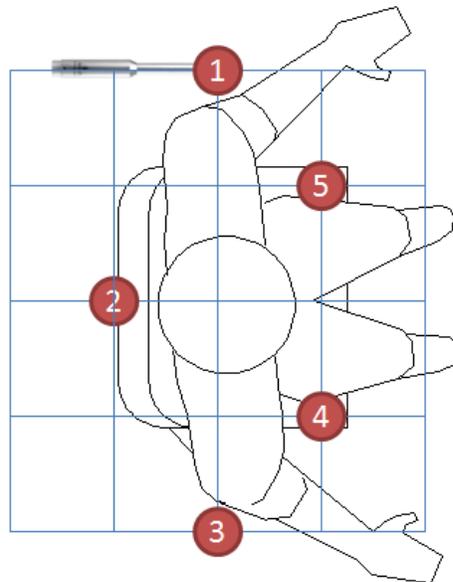
Tabla 8. Configuración del bloque *LMS filter* para los 6 algoritmos programados.

N° de Prueba	Algoritmo	CONFIGURACIÓN <i>LMS FILTER</i>		
		Filter Length	Step Size	Leakage
2 a	LMS	512	0.8	0.995
2 b	FX-LMS Delays	1024	1.2	0.7775
2 c	FX-LMS 450	1024	1.2	0.7775
2 d	FX-LMS 750	1024	1.2	0.7775
3 a	FX-LMS Lim. Delays	1024	1.2	0.995
3 b	FX-LMS Lim. 350	1024	1.2	0.9995

5.7.2 Evaluación del sistema

El sistema de control se evalúa comparando el nivel de presión sonora original (emitido por la fuente) y residual (con el sistema en funcionamiento). Estas mediciones se realizan para los 6 algoritmos programados, en 5 puntos de medición ubicados a la altura de los oídos (1.10 m sobre el suelo de la cabina), en el espacio sonoro del conductor, como se muestra en la figura 54.

Figura 54. Puntos de medición en el espacio sonoro del conductor a una altura de 1.10 m. El punto 1 corresponde a la posición del micrófono de error.



Como herramienta de medición, se utiliza el sonómetro *Svantek 943A* configurado por bandas de 1/3 de octava, en ponderación lineal, por medio del cual se realizan 4 mediciones de 30 segundos en cada punto. Con los datos adquiridos se hace un promedio energético (presión de referencia: 20μ pascuales), obteniendo resultados para cada algoritmo y punto de medición. Los más relevantes se presentan en la sección 6.3.1, para el punto de medición 1, se presentan los resultados obtenidos para los 6 algoritmos programados; para los demás puntos, únicamente se presentan los resultados obtenidos con el algoritmo Fx-LMS 450 (con el que se consigue mayor atenuación).

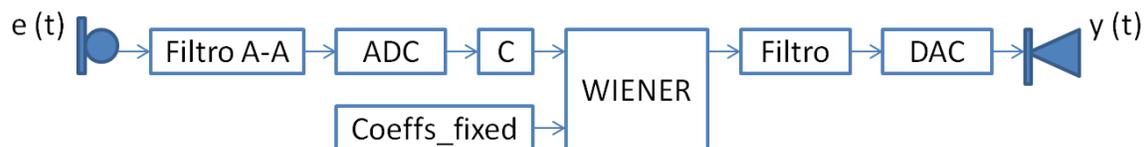
5.8 DISEÑO SISTEMA CAR FIJO MEDIANTE FILTRO DE WIENER

El sistema CAR fijo se diseña mediante una estrategia *feedback*, utilizando un micrófono de error únicamente. Se utiliza un filtro fijo Wiener para generar la señal de atenuación, este último se programa con los coeficientes del filtro adaptativo que presentan un mejor desempeño en la implementación del sistema. (Los detalles de la programación del filtro fijo se describen en la sección 5.8.1).

La señal de error es filtrada por la función de transferencia del camino secundario (para compensar sus efectos), luego por el filtro Wiener de control y realimentada al altavoz secundario. La señal de control es capturada nuevamente por el micrófono de error, generando un sistema en retroalimentación.

Al igual que para el diseño del sistema adaptativo, las señal de entrada es digitalizada mediante conversor análogo- digital (ADC) y filtro anti- *aliasing*, previamente al procesamiento. El proceso inverso, filtro de reconstrucción y conversor digital- análogo (DAC), se implementa para reproducir la señal de control. En la figura 55 se muestra un esquema del sistema CAR fijo y sus componentes.

Figura 55. Diagrama del sistema CAR fijo feedback, donde $e(t)$ señal de error, $y(t)$ señal de control, Coeffs_fixed coeficientes del filtro Wiener fijo y C , función de transferencia estimada del camino secundario.



5.8.1 Diseño filtro Wiener

El filtro Wiener se diseña a partir del algoritmo que presenta los mejores resultados de atenuación, en las pruebas de implementación del sistema CAR adaptativo. Los coeficientes del algoritmo adaptativo utilizado se almacenan en una variable *.mat* por medio de *Simulink*, como se muestra en la figura 56.

El algoritmo escogido es el Fx-LMS con la función de transferencia del camino secundario estimada con 450 coeficientes, debido a que se alcanzan atenuaciones globales de aproximadamente 3 dB.

Se realiza una simulación de 85 segundos, donde se almacenan los diferentes coeficientes del filtro adaptativo, obteniendo una matriz de 1025 columnas y 97560 filas, donde cada columna contiene los 1024 coeficientes del filtro en cada unidad de tiempo de simulación (desde 1 hasta 97560). El filtro Wiener fijo se programa con los coeficientes obtenidos en el tiempo 97560 para asegurar que el algoritmo ya ha convergido a su resultado más óptimo (cuando esto ocurre se dice que el algoritmo convergido a su solución “Wiener”). En el siguiente código se muestra la obtención de los coeficientes:

```
>> open coeffs.mat

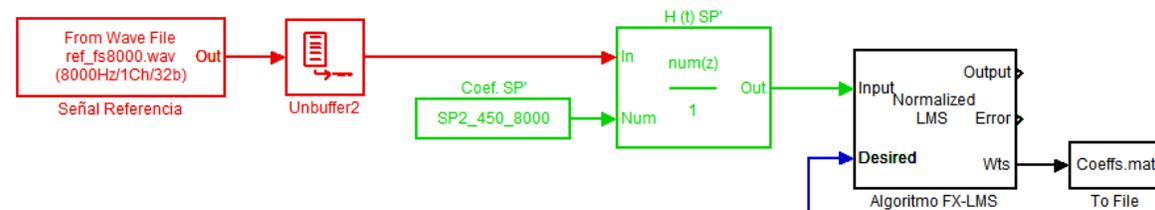
ans =

ans: [1025x97560 double]

>> coeffs_adapt=ans.ans;
>> coeffs_fixed=coeffs_adapt(2:1025,97560);
```

Donde “coeffs.mat” es la matriz de coeficientes obtenidos desde *Simulink* y “coeffs_fixed” es el vector de 1024 coeficientes obtenidos de la columna 97560 de la matriz “coeffs_adapt”.

Figura 56. Sistema CAR adaptativo modelado en *Simulink*, para la obtención de los coeficientes del algoritmo adaptativo Fx-LMS 450.



5.9 IMPLEMENTACIÓN SISTEMA CAR FIJO

El sistema CAR fijo se implementa en el interior del vehículo, mediante el mismo montaje que el sistema adaptativo (figura 46), excepto que no se utiliza micrófono de referencia, esto lo convierte en un sistema *feedback*. En la figura 57 se presenta el flujo de señal de este.

La señal de error $e(t)$ es capturada por el micrófono *Berhinger ECM8000*, pre amplificada mediante la consola *Yamaha MG102C* y conectada a la tarjeta DSP TMS320C6713, por medio de la entrada de línea estéreo. La salida producida por ésta es amplificada mediante el amplificador *Creative GD580* para alimentar el altavoz secundario *subwoofer GD580* que reproduce la señal de control y (t) .

En la tarjeta DSP se implementa el algoritmo de control con las características que se presentan en la tabla 9.

Figura 57. Flujo de señal del sistema CAR fijo implementado al interior del vehículo. La línea roja representa el camino acústico secundario SP .

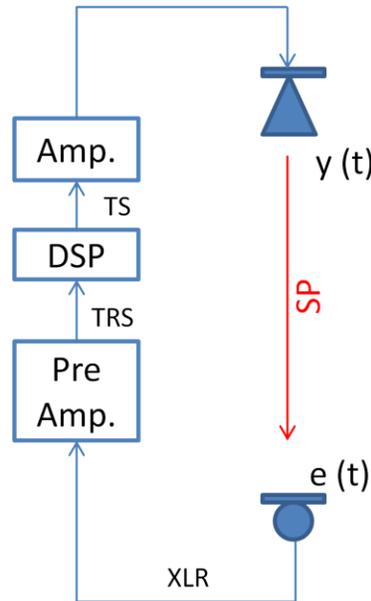


Tabla 9. Características del algoritmo fijo implementado en la tarjeta DSP.

Algoritmo	CARACTERÍSTICAS		
	Filtro Limitador	$H(t)$ Camino Secundario	Filtro WIENER
FIJO	No	450 coeficientes	1024 coeficientes

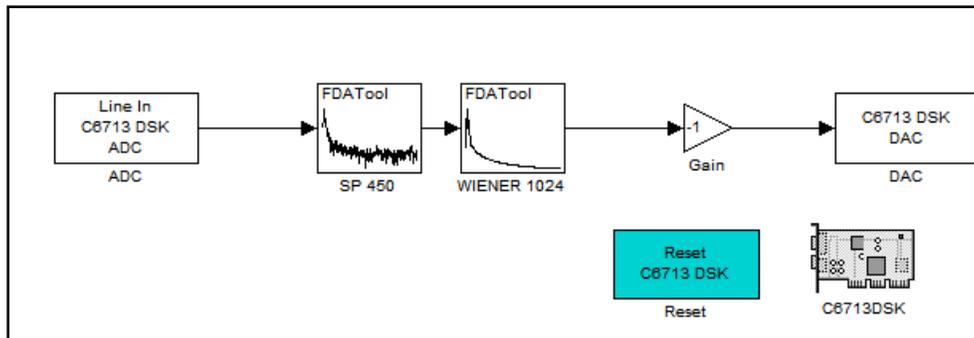
5.9.1 Programación algoritmo fijo

Al igual que los algoritmos adaptativos, la programación del algoritmo fijo que utiliza el filtro Wiener se realiza en *MATLAB/Simulink*, y se transfiere a la tarjeta DSP mediante el programa *Code Composer Studio*. La figura 58 presenta el diagrama de bloques del algoritmo fijo programado.

5.9.2 Evaluación del sistema

El sistema de control fijo se evalúa siguiendo la metodología de la sección 5.7.2. Se realizan mediciones únicamente en el punto 3 (Ver figura 54), donde se obtienen los mejores resultados en la implementación del sistema adaptativo. Los resultados del sistema fijo se presentan en el capítulo 6.3.2.

Figura 58. Algoritmo fijo, con función de transferencia del camino secundario estimada (450 coeficientes) y filtro Wiener fijo de 1024 coeficientes.



5.10 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA CAR

En esta sección se exponen los procedimientos seguidos para mejorar el desempeño del sistema, posterior a las pruebas de campo realizadas para los sistemas: fijo y adaptativo. La optimización se basa en dos conclusiones principales:

1. El sistema adaptativo por medio del algoritmo Fx-LMS presenta un mejor desempeño que el sistema fijo por medio del filtro Wiener (Ver sección 6.3.3).
2. El punto 3 corresponde al punto de mayor atenuación, en el espacio sonoro del conductor (Ver sección 6.3.1).

Estas indican que el sistema puede ser optimizado cambiando la ubicación del micrófono de error (figura 37) a la posición que se muestra en la figura 59. De ésta manera el algoritmo adaptativo será forzado a minimizar el nivel de presión sonora medido en el micrófono de error en la nueva posición, haciendo posible alcanzar una atenuación mayor en este punto.

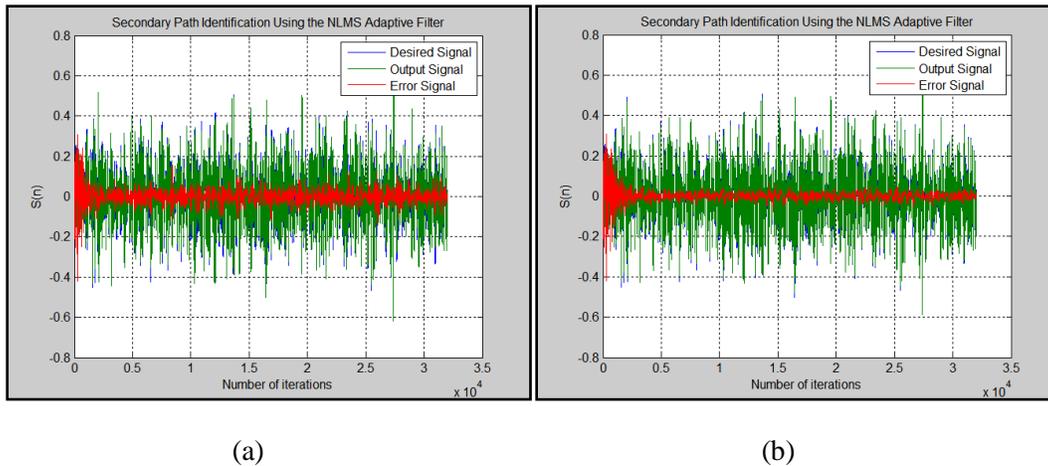
Figura 59. Ubicación micrófono de error sistema optimizado.



Cambiar la posición del micrófono de error, hace necesario estimar nuevamente la función de transferencia del camino secundario; esta tarea se realiza de igual manera que en la sección 5.6.1, para 450 y 750 coeficientes, como se muestra en la figura 60.

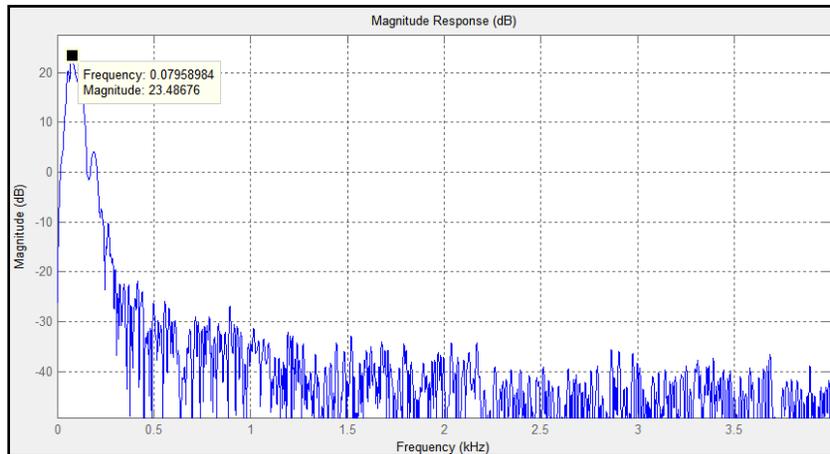
El camino secundario, después de la optimización, tiene una resonancia importante en **80 Hz**. Como se observa en la figura 63, este cambio en la ubicación del micrófono de error elimina la resonancia en 135 Hz, presente en el camino secundario del sistema sin optimizar.

Figura 60. Identificación del camino secundario mediante el filtro adaptativo LMS normalizado para el sistema optimizado, con (a) 450 coeficientes. (b) 750 coeficientes.



El análisis del camino secundario se muestra en la figura 61.

Figura 61. Respuesta en frecuencia del camino secundario estimado con 750 coeficientes, sin limitación del ancho de banda.



El retardo del camino secundario se reduce de 2ms a **1 ms** con la optimización, éste se mide de igual manera que en el capítulo 5.6.3.2. Esta disminución de la separación entre el micrófono de error y el altavoz, aumenta la eficacia de un sistema CAR, como lo comprobaron Olson y May en

1953.⁵¹ En la tarjeta DSP se implementan 3 algoritmos Fx-LMS, con los datos obtenidos anteriormente. Las características se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Características algoritmos optimizados implementados en la tarjeta DSP.

ALGORITMO	CARACTERÍSTICAS	
	Filtro Limitador	$H(t)$ Camino Secundario
Fx-LMS Delay	No	8 muestras (1ms)
Fx-LMS 450	No	450 coeficientes
Fx-LMS 750	No	750 coeficientes

5.9.2 Evaluación del sistema

El sistema CAR optimizado, con los algoritmos Fx-LMS, se evalúa en la nueva posición del micrófono de error como se muestra en la figura 62, siguiendo la metodología del capítulo 5.7.2. Los resultados obtenidos se presentan en la sección 6.3.4.

Figura 62. Punto de medición del sistema CAR optimizado.



⁵¹ COBO PARRA, Fundamentos del Control Activo del Ruido. Op cit., p. 78.

6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 VARIABLES DE LA FUENTE DE RUIDO

En esta sección se analiza la influencia que tiene la velocidad del ventilador y la apertura de las rejillas sobre el nivel de presión sonora de la fuente de ruido.

6.1.1 Velocidad del ventilador (RPM)

Tabla 11. Nivel de ruido producido por el sistema de ventilación, según las diferentes velocidades de funcionamiento del ventilador (medido con las rejillas laterales totalmente cerradas).

NPS (dB) AIRE ACONDICIONADO					
CONDUCTOR			COPILOTO		
60s	Leq		60s	Leq	
PERFIL	1	2	PERFIL	1	2
	FAST A	FAST LIN		FAST A	FAST LIN
RUIDO DE FONDO (motor a 1000rpm)					
1	43.1	74.7	1	41.8	75.7
2	43.7	74.7	2	43.9	75.4
PROM. ENERGÉTICO	43.41	74.70	PROM. ENERGÉTICO	42.91	75.55
VELOCIDAD 1					
1	49.3	88.4	1	49.2	88.0
2	46.9	85.2	2	47.0	85.1
PROM. ENERGÉTICO	48.18	86.95	PROM. ENERGÉTICO	48.17	86.67
Dif. ruido de fondo:	4.77	12.25	Dif. ruido de fondo:	5.26	11.12
VELOCIDAD 2					
1	52.7	87.4	1	53.2	87.1
2	52.8	87.1	2	53.3	86.7
PROM. ENERGÉTICO	52.75	87.25	PROM. ENERGÉTICO	53.25	86.90
Dif. ruido de fondo:	9.34	12.55	Dif. ruido de fondo:	10.34	11.35
VELOCIDAD 3					
1	57.7	89.0	1	58.7	88.4
2	58.0	88.9	2	58.9	88.4
PROM. ENERGÉTICO	57.85	88.95	PROM. ENERGÉTICO	58.80	88.40
Dif. ruido de fondo:	14.44	14.25	Dif. ruido de fondo:	15.8	12.85

VELOCIDAD 4					
1	62.7	91.2	1	63.5	90.5
2	63.1	91.2	2	63.2	90.4
PROM. ENERGÉTICO	62.90	91.20	PROM. ENERGÉTICO	63.35	90.45
Dif. ruido de fondo:	19.49	16.50	Dif. ruido de fondo:	20.44	14.90

En la tabla 11 se observa que para las velocidades 1 y 2, el nivel de ruido adicionado por el sistema de ventilación (HVAC) no supera los 13 dB lin, mientras que para las velocidades 3 y 4, se registran niveles de presión sonora que superan el ruido de fondo en 20.4 dBA y 16.5 dB lin.

Para la velocidad 4 se registran los mayores niveles de ruido, llegando a los 91.2 dB lin, además del mayor nivel de ruido percibido 62.9 dBA, llegando a ser esta la configuración de la fuente mas molesta. Por lo cual el diseño del sistema de control activo de ruido (CAR) se realiza tomando, como base, la señal producida por la fuente de ruido en velocidad 4 de giro.

6.1.2 Apertura de las rejillas

Tabla 12. Nivel de ruido producido por el sistema de ventilación, según el estado de apertura de las rejillas laterales (medido con la velocidad 4 del ventilador).

NPS (dB) AIRE ACONDICIONADO		
CONDUCTOR	60 s	Leq
PERFIL	1	2
	FAST A	FAST LIN
RUIDO DE FONDO (motor a 1000 rpm)		
1	49.6	83.0
2	46.6	80.9
PROM. ENERGÉTICO	48.23	82.01
REJILLAS 100% CERRADAS		
1	71.7	95.0
2	71.6	95.3
PROM. ENERGÉTICO	71.65	95.15
Dif. Ruido de fondo	23.42	13.14
REJILLAS 50% ABIERTAS		
1	66.0	91.0
2	66.1	91.5
PROM. ENERGÉTICO	66.05	91.25

Dif. Ruido de fondo	17.82	9.24
REJILLAS 100% ABIERTAS		
1	64.6	91.1
2	64.6	91.2
PROM. ENERGÉTICO	64.60	91.15
Dif. Ruido de fondo	16.37	9.14

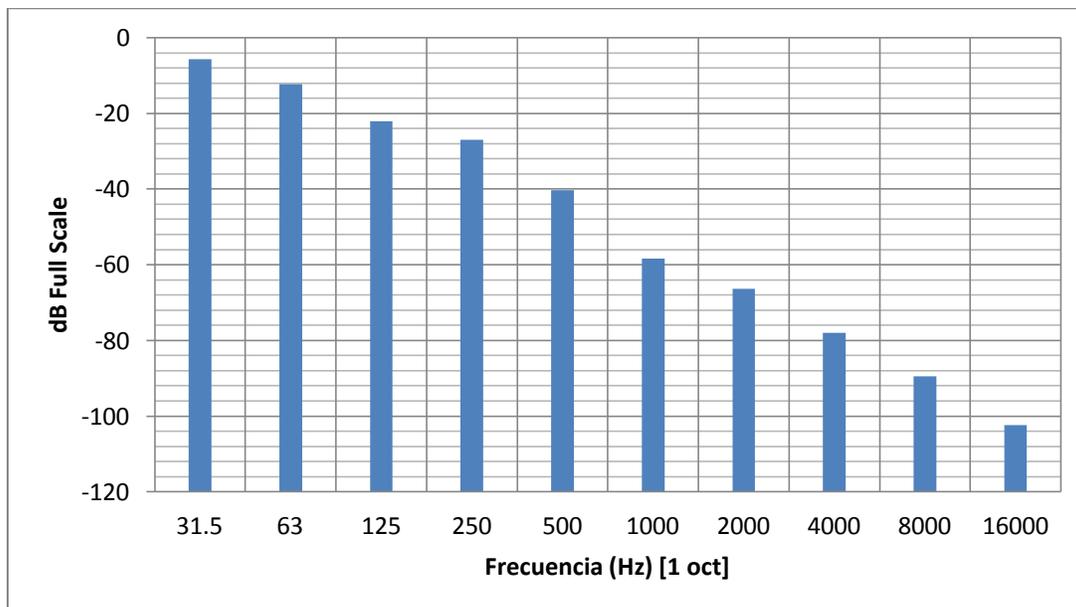
Al estudiar los diferentes estados de apertura de las rejillas de ventilación, se concluye que resulta más conveniente implementar el sistema de control con las rejillas laterales totalmente cerradas, pues como se observa en la tabla 12, para esta configuración se registran los niveles más altos de ruido, alcanzando 95.2 dB lin en comparación con las demás; de 91.3 dB lin para las rejillas 50% abiertas y 91.1 dB lin para las rejillas totalmente abiertas.

Este fenómeno se debe al aumento del flujo de aire que circula por el interior del ducto hacia las rejillas centrales, haciendo que este sea liberado hacia la cabina con mayor velocidad, teniendo como consecuencia un incremento en el nivel de presión sonora.

6.2 CARACTERIZACIÓN FUENTE DE RUIDO

6.2.1 Análisis en frecuencia de la señal de ruido

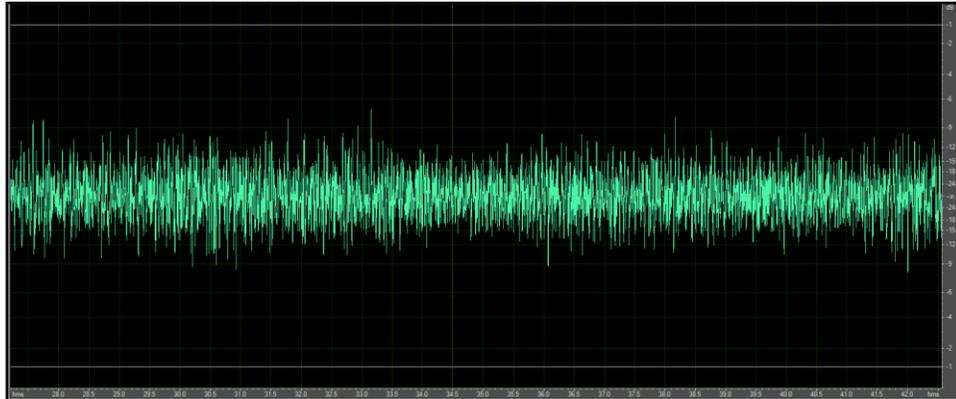
Grafica 1. Espectro de la señal $x(t)$ obtenida para la velocidad 4, por bandas de octava normalizadas.



En la grafica 1 se observa que la señal de ruido a tratar tiene un contenido energético importante en las bandas de frecuencia baja (31.5, 63, 125, 250), el cual disminuye a medida que aumenta la frecuencia. En esta, no es posible observar un comportamiento tonal.

6.2.2 Análisis en tiempo de la señal de ruido

Figura 63. Respuesta temporal de la señal de ruido medida durante 30 segundos.



En la figura 63. Se observa un comportamiento aleatorio de la señal obtenida. Donde no es visible ningún patrón que indique su periodicidad.

6.3 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

En esta sección se presentan, los resultados obtenidos en la implementación de los 3 sistemas CAR diseñados: adaptativo, fijo y optimizado; se comparan los sistemas fijo y adaptativo, determinando el mas eficiente; y el sistema optimizado y sin optimizar.

Los valores de atenuación obtenidos se presentan en tablas, por bandas de tercio de octava normalizadas (desde 25 Hz hasta 4 KHz), donde el color negro indica reducción y el rojo aumento en el nivel de presión sonora. Las comparaciones realizadas se presentan en forma de graficas de barras, donde cada una indica el nivel de reducción por bandas de tercio de octava.

6.3.1 Sistema adaptativo

Al implementar el sistema adaptativo, mediante los diferentes algoritmos programados, se comprueba que en el punto de medición número uno, no es posible obtener atenuación relevante entre las bandas de operación esperadas (50 - 250 Hz) para ninguno de los algoritmos, pues ninguno de estos presenta resultados de atenuación mayores a 0.82 dB, como se observa en la tabla 13.

Tabla 13. Atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 1, con los distintos algoritmos.

F (Hz)	ATENUACIÓN (dB lin)					
	LMS	Fx-LMS Delay	Fx-LMS 450	Fx-LMS 750	Fx-LMS Lim. Delay	Fx-LMS Lim. 350
25	0.21	2.36	-1.54	-2.04	-0.39	-1.74
31.5	-2.17	1.62	-1.27	-1.64	-0.23	-1.68
40	0.66	-1.38	-2.40	-1.97	-0.79	1.53
50	-0.84	-10.88	-11.93	-11.00	-0.19	-0.06
63	0.23	-17.80	-17.79	-17.11	0.35	0.05
80	-1.86	-23.72	-25.09	-24.79	-0.10	-0.27
100	-1.08	-20.29	-17.59	-17.13	-0.12	0.02
125	0.43	-10.60	-5.38	-5.06	0.30	0.82
160	-0.03	-6.43	-1.87	-1.52	0.35	0.57
200	0.10	-1.38	-0.31	-0.15	0.17	0.25
250	0.17	-2.28	0.12	0.35	0.50	0.65
315	0.75	2.50	1.15	1.67	1.55	1.37
400	1.17	3.40	0.82	1.85	0.95	1.50
500	-0.28	1.76	0.52	-0.10	0.00	0.50
630	-1.52	1.08	0.39	-0.72	-1.60	-0.03
800	-0.64	1.49	-0.01	0.37	-1.07	0.17
1000	0.64	3.21	1.96	1.64	2.56	1.65
1250	-0.04	2.73	1.05	2.06	1.91	1.24
1600	-0.65	1.77	0.35	0.73	-0.23	0.35
2000	1.15	3.77	0.88	0.38	0.37	0.70
2500	0.62	1.90	-0.17	0.05	-0.78	0.29
3150	-0.78	1.82	0.10	-0.07	-0.32	0.79
4000	0.42	3.25	0.52	0.75	0.70	1.37
TOT_Lin	0.20	-2.57	-4.25	-4.27	-0.32	-1.54

En el algoritmo LMS esto se debe a que no se tiene en cuenta la función de transferencia del camino secundario, en los algoritmos con limitación de ancho de banda (Fx-LMS Lim. Delay, Fx-LMS Lim. 350) se considera que el retardo de grupo del filtro limitador (42 ms) causa que no se cumpla el principio de causalidad, por lo tanto cuando la señal secundaria es reproducida por el sistema de control, el ruido ya presenta otras características (debido a su comportamiento aleatorio).

Para los algoritmos Fx-LMS (Delay, 450 y 750), se considera que la resonancia existente en la cabina, encontrada al estimar la función de transferencia del camino secundario es la causa de que el sistema no actué adecuadamente en este punto y en especial para la banda de 80 Hz y adyacentes.

Sin embargo esto demuestra la interacción del sistema con el campo sonoro primario, contrario a los algoritmos anteriores, donde no se observa variación relevante entre la respuesta con el sistema apagado y encendido.

Tabla 14. Atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo. Por bandas de 1/3 de octava, en el los 5 puntos escogidos, para el algoritmo Fx-LMS 450.

F (Hz)	ATENUACIÓN (dB lin)					
	[1/3 oct]	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
25		-1.54	0.90	3.15	3.90	-3.60
31.5		-1.27	-2.90	3.81	3.20	-17.10
40		-2.40	-3.40	3.27	0.30	-16.10
50		-11.93	-7.10	2.88	-4.50	-18.70
63		-17.79	-11.50	2.78	-9.70	-20.30
80		-25.09	-12.80	1.58	-22.10	-27.40
100		-17.59	-11.20	2.66	-10.30	-23.70
125		-5.38	-9.80	2.76	0.40	-20.90
160		-1.87	-4.00	2.80	1.00	-20.20
200		-0.31	-0.10	2.98	-4.00	-19.90
250		0.12	1.70	3.23	-5.60	-21.70
315		1.15	-0.20	3.85	-1.60	-19.10
400		0.82	-4.10	4.33	2.70	-23.70
500		0.52	-3.90	5.18	3.80	-17.20
630		0.39	-2.40	6.19	1.30	-11.20
800		-0.01	-4.10	7.01	5.50	-12.40
1000		1.96	-4.60	7.31	2.90	-5.00
1250		1.05	-6.50	6.19	7.80	-0.80
1600		0.35	-7.80	3.60	7.80	-3.30
2000		0.88	-5.30	1.02	4.50	-0.50
2500		-0.17	-3.30	0.49	2.90	0.30
3150		0.10	-5.30	1.02	4.80	-0.30
4000		0.52	-3.80	0.07	4.60	2.80
TOT_Lin		-4.25	-0.80	3.15	0.60	-9.80

Al evaluar el sistema en los cinco puntos de medición propuestos, se deduce que el punto tres presenta las mejores condiciones de atenuación, como se muestra en la tabla 14, la medición en este punto presenta resultados de atenuación con valores entre (1.58 y 3.23 dB) entre las bandas de operación esperadas. Por fuera de estas también se observan resultados debido a que el ancho de banda no esta limitado en este algoritmo.

En los demás puntos, no se produce atenuación y contrario a esto se incrementa el NPS, esto debido a la interferencia que existe por parte del cuerpo del conductor sobre la señal de control, a excepción del punto 3 donde esta no se presenta.

6.3.2 Sistema fijo

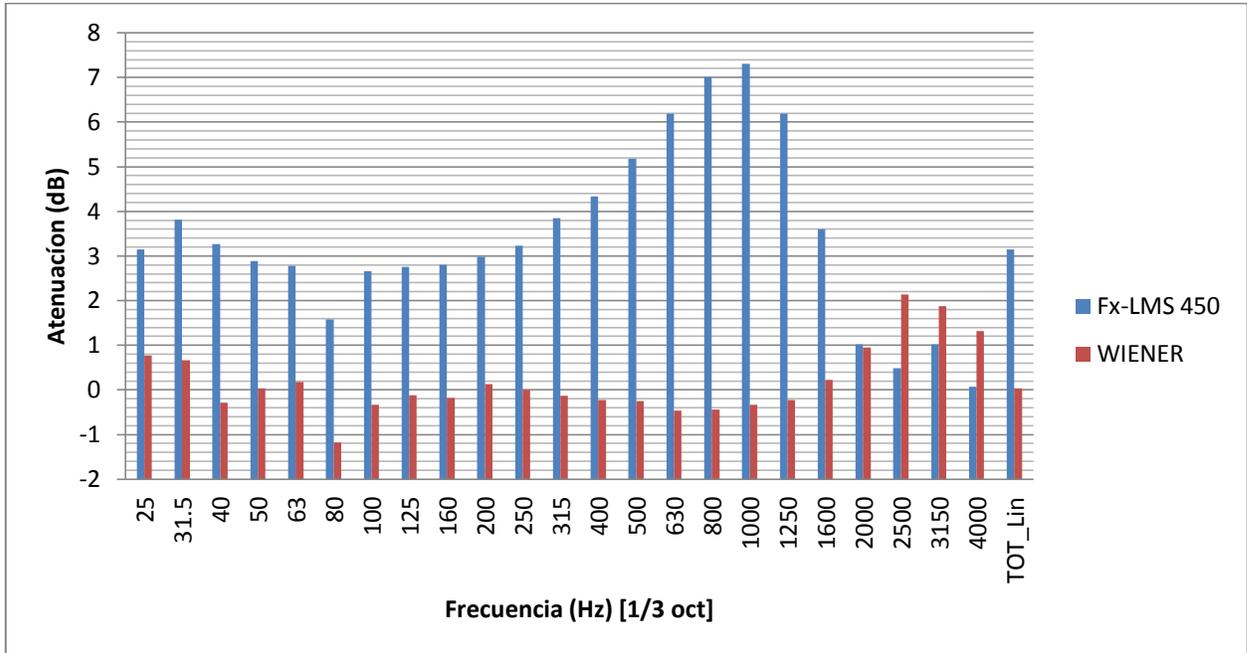
Tabla 15. Atenuación obtenida para el sistema CAR fijo. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 3. Utilizando el filtro Wiener.

ATENUACIÓN (dB lin)	
F (Hz) [1/3 oct]	WIENER
25	0.77
31.5	0.66
40	-0.29
50	0.03
63	0.18
80	-1.18
100	-0.33
125	-0.12
160	-0.18
200	0.13
250	0.00
315	-0.13
400	-0.23
500	-0.25
630	-0.47
800	-0.44
1000	-0.33
1250	-0.23
1600	0.23
2000	0.95
2500	2.14
3150	1.87
4000	1.32
TOT_Lin	0.03

El sistema fijo mediante el filtro Wiener presenta poca interacción con el campo sonoro original, pues los niveles de reducción o aumento del NPS no superan los 0.33 dB en la banda esperada, excepto por un incremento de 1.18 dB en 80 Hz.

6.3.3 Comparación sistemas adaptativo y fijo

Grafica 2. Comparación Atenuación obtenida para el sistema adaptativo, utilizando el algoritmo Fx-LMS 450; y fijo, utilizando filtro Wiener. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 3.



Al hacer una comparación entre el sistema fijo mediante filtro Wiener y el sistema adaptativo con el algoritmo de mejor resultado, se determina que este ultimo tiene un mejor desempeño, para reducir el nivel de ruido, pues presenta mayor atenuación en todas las bandas del rango de frecuencia esperado, mientras el sistema fijo aumenta el NPS en 4 de estas. Los mejores resultados son debidos a la capacidad del sistema adaptativo para predecir el comportamiento del ruido.

6.3.4 Sistema optimizado

La implementación de los diferentes algoritmos programados en el punto de optimización, muestra que el algoritmo de mejor respuesta es el Fx-LMS 450 alcanzando reducciones de 4.63 dB en la banda de operación esperada, como se observa en la tabla 16. Esto debido a que se programa teniendo en cuenta la función de transferencia del camino secundario y presenta un equilibrio entre el tiempo de adquisición, procesamiento y reproducción de la señal, respecto al Fx-LMS 750 el cual representa con mayor exactitud el camino secundario pero tarda mas tiempo en el procesamiento

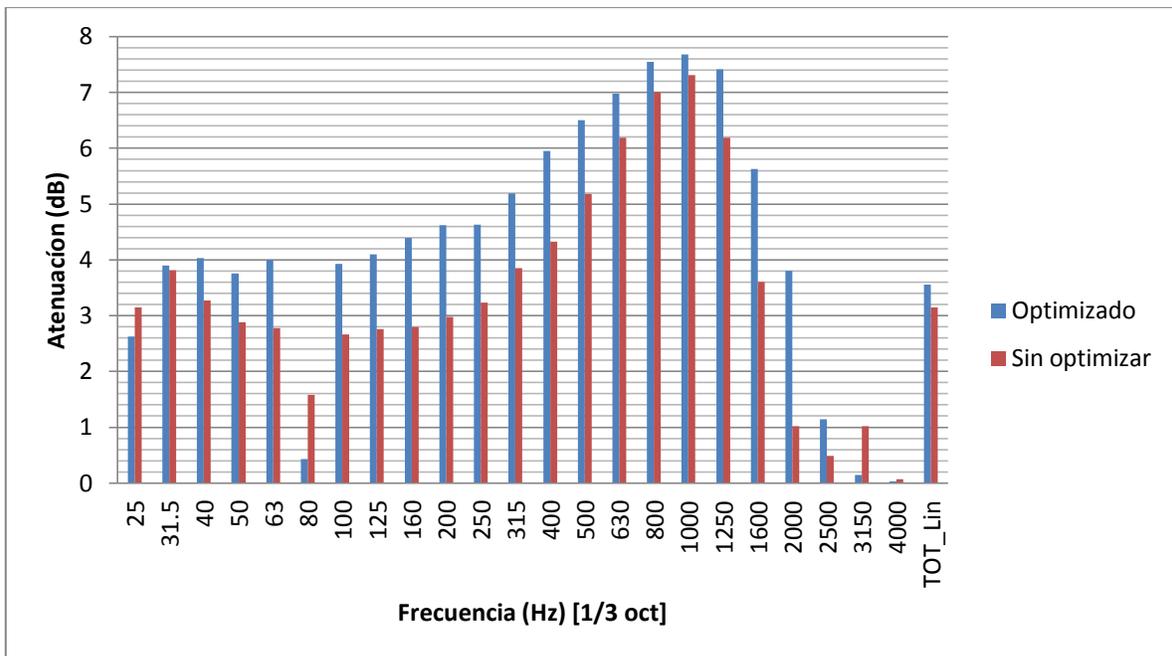
Tabla 16. Atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo optimizado. Por bandas de 1/3 de octava, en el punto 3, con los distintos algoritmos.

F [Hz]	Fx-LMS Delay	Fx-LMS 450	Fx-LMS 750
25	1.36	2.63	2.86
31.5	2.07	3.90	2.30
40	1.95	4.03	2.98
50	2.04	3.76	2.57
63	2.28	4.00	2.59
80	1.63	0.43	-1.32
100	2.23	3.93	2.88
125	2.18	4.10	3.24
160	2.16	4.39	3.63
200	2.31	4.62	3.57
250	2.43	4.63	3.73
315	2.70	5.19	4.23
400	3.16	5.95	4.72
500	3.40	6.50	5.10
630	3.76	6.98	5.34
800	4.15	7.55	5.80
1000	4.40	7.68	5.75
1250	4.63	7.42	5.33
1600	3.06	5.63	4.43
2000	2.55	3.80	3.35
2500	0.93	1.14	0.75
3150	0.46	0.14	-0.51
4000	0.38	0.03	-0.21
TOT_Lin	2.14	3.56	2.52

6.3.5 Comparación sistema optimizado y sin optimizar

La optimización del sistema tiene como resultado un incremento en la atenuación lograda respecto al sistema sin optimizar, en el punto de medición tres, en casi todo el espectro (como se muestra en la grafica 3), esto debido a la mayor cercanía entre la fuente secundaria y el micrófono de error lo que reduce la complejidad de la función de transferencia y disminuye el tiempo de retardo del camino secundario. Excepto en las bandas de 25 y 80 Hz, donde se nota un leve incremento en el NPS, respecto al sistema sin optimizar.

Grafica 3. Comparación entre la atenuación obtenida para el sistema CAR adaptativo optimizado y sin optimizar, con el algoritmo Fx-LMS 450, (punto 3).



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

En este proyecto se diseñaron, modelaron e implementaron distintos sistemas de control activo por medio de configuraciones *feedforward* (adaptativo y optimizado) y *feedback* (fijo); implementando algoritmos adaptativos (LMS y Fx-LMS) y fijos (Wiener). Con el objetivo de controlar el ruido producido por el sistema de aire acondicionado al interior de un vehículo convencional, logrando obtener reducciones en los niveles de ruido de hasta 4.6 dB antes de la frecuencia máxima de funcionamiento esperada (230 Hz), y 7.7 dB después de esta, en un punto de medición en el espacio sonoro del conductor.

Los resultados, obtenidos en las simulaciones y pruebas experimentales, permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- El programa *Simulink* es una herramienta apropiada para el desarrollo de algoritmos para sistemas CAR puesto que es posible simular condiciones reales de funcionamiento, permitiendo configurar los algoritmos adaptativos de una manera óptima, previamente a su implementación.
- El algoritmo adaptativo LMS implementado en un sistema CAR no produce atenuación del nivel de ruido antes ni después de la frecuencia máxima esperada, consiguiendo valores máximos de 0.7 dB (40 Hz) antes de esta y 1.2 dB (400 Hz) después; esto debido a que no tiene en cuenta la función de transferencia del camino secundario.
- La implementación del filtro limitador de ancho de banda no mejora el rendimiento del sistema CAR, debido al retardo de grupo del mismo, que evita se cumpla el principio de causalidad .
- El sistema produce atenuación del ruido únicamente en el punto de medición tres, en los otros puntos se presenta un aumento del nivel de ruido de hasta 27.4 dB (80 Hz, punto cinco) en el ancho de banda esperado de funcionamiento; esto debido a la interferencia originada por el conductor entre la fuente secundaria y el micrófono de error, además de las resonancias encontradas en el camino secundario.
- El sistema adaptativo mediante algoritmos Fx-LMS presenta los mejores resultados para atenuar el ruido producido por el sistema de ventilación, alcanzando reducciones máximas de 3.2 dB (250 Hz) antes de la frecuencia máxima esperada y 7.3 dB (1000 Hz) después de esta; para el sistema sin optimizar.
- La implementación de un sistema CAR fijo, mediante filtro Wiener no resulta eficaz para controlar este tipo de ruido, obteniendo un aumento en los niveles, en 4 bandas antes de la

frecuencia máxima esperada y en 8 bandas después de esta. Siendo mas conveniente el uso de un sistema adaptativo.

- La optimización del sistema mejora su desempeño, consiguiendo incrementar la atenuación en hasta 1.6 dB (200 Hz) antes de la frecuencia máxima esperada y 2.8 dB (2000 Hz) después de esta; esto debido a la simplificación en la función de transferencia del camino secundario, puesto que en la nueva posición del micrófono de error no existe la interferencia originada por el cuerpo del conductor.
- Al realizar la programación del algoritmo de control se debe tener en cuenta la función de transferencia del camino secundario para obtener mejores resultados, sin embargo es necesario que el algoritmo este acorde con el poder computacional de la tarjeta; éste resulta ser muy insuficiente para procesar el algoritmo Fx-LMS 750, consiguiendo mayor atenuación con una estimación de 450 (4.6 dB respecto a 3.7 dB en 250 Hz).
- En general, la atenuación obtenida después de la frecuencia máxima esperada de trabajo es mayor que antes de esta; sin embargo, debido a que el tamaño de la zona de silencio que se genera para frecuencias mayores a 230 Hz es de radio menor a 15 cm, se considera irrelevante; pues no alcanza a abarcar la distancia interaural (si se emplea un solo micrófono de error).
- La presencia de modos de resonancia en la cabina del vehículo, tiene una influencia directa sobre la eficiencia del sistema, haciendo que este sea deficiente en la banda de 80 Hz; donde se encuentra una disminución en la reducción obtenida respecto a las bandas adyacentes, para todos los sistemas y algoritmos.

Debido al número de las zonas de atenuación obtenidas y la reducción máxima conseguida, se considera que:

- El control activo de ruido aplicado al interior de recintos no es, actualmente una herramienta efectiva para reducir, de manera importante y en un espacio razonable, ruidos de banda ancha con características aleatorias, como el producido por sistemas de aire acondicionado de un vehículo.

7.2 RECOMENDACIONES

- Previo a definir el método de control de ruido a implementar, se deben conocer las características tonales, temporales y de ancho de banda de la fuente de ruido a controlar y el comportamiento acústico del recinto. Esto definirá la viabilidad de implementar un sistema CAR, sobre métodos pasivos.
- Se recomienda implementar sistemas de control activo preferiblemente si el ruido a controlar es de banda angosta, debido a que una limitación en el ancho de banda causa

retardo en el procesamiento, si se utiliza un filtro digital FIR, o cambio de fase, si se utiliza un filtro análogo sobre la señal original.

- El control activo de ruido, para controlar el ruido producido por un sistema HVAC, puede ser más efectivo si se aplica al interior del ducto, puesto que la función de transferencia del camino secundario se hace más simple, debido a la formación de ondas planas.
- Los efectos de la retroalimentación entre la fuente secundaria y el micrófono de referencia se pueden compensar utilizando el algoritmo Fu-RLMS en vez del Fx-LMS, mejorando el desempeño del sistema. En este proyecto la retroalimentación es reducida pero no eliminada utilizando un micrófono tipo *Shotgun*.
- Se recomienda utilizar un mayor número de micrófonos de error para aumentar el tamaño de la zona de silencio en un control local, puesto que con esta configuración se logran zonas de silencio de máximo 1/10 de la longitud de onda alrededor de cada micrófono.
- Para lograr un desempeño óptimo del sistema CAR es necesario medir la potencia acústica de fuente primaria y secundaria en las bandas de funcionamiento del sistema, y asegurarse de que sean iguales, puesto que una variación entre éstas es determinante para los resultados finales.
- Para la correcta comprobación del funcionamiento de un sistema CAR, se hace necesario disponer de espacios adecuados de medición con un nivel de ruido de fondo bajo y estable.
- Implementar un sistema CAR con fines comerciales al interior de un vehículo requiere minimizar el tamaño de los implementos que hacen parte del sistema. Principalmente: pre amplificadores, amplificadores, transductores.

8. BIBLIOGRAFÍA

ANEXO E: MODELOS EN MATLAB/SIMULINK. En:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2696/6/36106-6.pdf>

BORES SIGNAL PROCESSING. Introduction to DSP - Filtering: Design by Equiripple Method.

En: http://www.bores.com/courses/intro/filters/4_equi.htm, 2009.

CD X ONLINE eTEXTBOOK. Controlando un sistema de calefacción. En:

http://www.cdxtetextbook.com/procedures_sp/chkheatsysSP.html

CENTRO TECNOLÓGICO DE TELECOMUNICACIONES DE CATALUNYA. El Filtro de Wiener. En: <http://www.cttc.es/resources/doc/080313-capiv-38065.pdf>

COBO PARRA, Pedro. Control Activo del Ruido. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid: Unigraf, 1997.

COBO, P; BRAVO, T; CUESTA, M; RANZ, C y SIGUERO, M. Control Activo del Ruido. En: digital.csic.es. Madrid: Instituto de Acústica CSIC.

COTANA, Franco; ROSSI, Federico y BURATTI, Cinzia. Active Noise Control Technique for Diesel Train Locomotor Exhaust Noise Abatement. En: 144avo congreso de le Sociedad Americana de Acustica (ASA).

CYRIL M, Harris. Manual De Medidas Acústicas Y Control De Ruido. Madrid: Mc Graw Hill. Tercera Edición, Volumen 2. Capítulos 41 Y 42. 1995.

ENCICLOPEDIA VIRTUAL DUIOPS. Filtro Digital. En: <http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/filtro-digital.htm>, 2007.

MASGRAU, Enrique; ORTEGA Alfonso; RAMOS, Pedro; VICENTE, Luis y LLEIDA, Eduardo. Tratamiento Robusto del Sonido en el Interior de Vehículos. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Grupo de Tecnologías de la Comunicaciones (GTC).

GARCÍA OCHOA, Sonia. Ruido en el Tráfico es Causa de Estrés, Ansiedad, Agresión e Irritabilidad. En: <http://www.oem.com.mx/laprensa/>. México: Organización Editorial Mexicana, 2010.

GONZÁLEZ, F.A.; ROSSI, R.; MOLINA, G.R. y PARLANTI, G. Desarrollo e Implementación de un Controlador Activo de Ruido de Banda Angosta Adaptativo. En: Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (1: 2-4, marzo: Buenos Aires, Argentina). Memorias. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2011. p. 1-6.

HANSEN, Colin. Understanding Active Noise Cancellation. Taylor & Francis e-Library, 2003. 173 p. ISBN 0-203-77557-0

HASHIMOTO, Hiroyuki. KAKUHARI, Isao. Active Control System for Low Frequency Road Noise Combined with an Audio System. En: Audio Engineering Society (AES) E- Library. www.aes.org/e-lib/. 2001.

IMAGESARTIC. Esquema Circuito Refrigerante. En: www.mecanicavirtual.org

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARIZATION. ISO3382-2:2008 Acoustic-Measurement of room acoustic parameters- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=36201, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARIZATION. ISO5128:1980 Acoustics-Measurement of noise inside motor vehicles. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=11127, 1980.

LA HISTORIA DEL AIRE ACONDICIONADO AUTOMOTOR. Partes de un Sistema de Aire Acondicionado Automotor En: www.monografias.com. 2000.

LA ROSA MACEDO, Daniel. Estudio y Simulación de Protectores Auditivos para la Atenuación del Ruido Generado por un Martillo Neumático Aplicando Control Activo de Ruido. Trabajo de grado Ingeniero Electrónico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2008.

PRESENTACIÓN: ON ROAD DEMONSTRATION OF NOISE CONTROL IN A PASSENGER AUTOMOBILE. (2: 20-22, septiembre, 2004: Williamsburg, VA, USA).

RAMÍREZ NUÑO, Juan C. Clasificación de los Filtros por su Respuesta. México: Universidad de la Salle Bajío, 2003.

SCHIRMACHER, Rolf. Active Design of Automotive Engine Sound. En: Audio Engineering Society (AES) E- Library. www.aes.org/e-lib/. Munich: Müller-BBM GmbH, Planegg, 2002.

GLOSARIO

Ancho de Banda: Indica el rango de frecuencia presente en una señal sonora determinada.

Camino Primario: En un sistema CAR es el camino que recorre la señal desde el sensor de referencia hasta el sensor de error, este sólo se presenta en los sistemas de control *feedforward*.

Camino Secundario: Éste es el camino existente entre la fuente secundaria y el sensor de error.

Caracterización de fuente de Ruido: Proceso que se realiza para conocer las características tonales, temporales y de fase que pueden presentar algunos sonidos específicos. Es necesario hacer una caracterización de la fuente sonora para determinar si es posible controlarla con un sistema CAR.

Complejidad Geométrica: Hace referencia a las diferentes formas que puede contener un recinto cerrado, este resulta ser más complejo de acuerdo a la cantidad de formas irregulares que presente en su interior.

Control Activo de Ruido CAR: Técnica implementada en el control de ruido, la cual surge como una técnica complementaria al control pasivo de ruido; con ésta se obtienen mejores resultados en baja frecuencia, debido a que su tamaño no resulta ser dependiente de la longitud de onda de la frecuencia a controlar.

Distancia Interaural: Distancia existente entre los oídos de la persona promedio.

DSP: Dispositivo electrónico capaz de realizar procesamiento digital de señales, en tiempo real.

Feedback: Estrategia de CAR que implementa únicamente sensores de error para la captura de la señal a controlar, esta es alimentada directamente al altavoz secundario. Por lo general, se utiliza en sistemas invariantes en el tiempo.

Feedforward: Estrategia de CAR que implementa sensores de referencia y error, para generar, a partir de las señales capturadas por estos, la señal de control hacia el altavoz secundario. Por lo general, se implementa en sistemas variantes en el tiempo.

Filtro Digital: Tipo de filtro que opera sobre señales discretas y cuantizadas, implementado con tecnología digital.

Filtro Wiener: Tipo de filtro diseñado para reducir la cantidad de ruido de una señal, comparándola con una estimación de la señal deseada sin ruido.

Fuente de Ruido: En sistemas CAR, hace referencia a la fuente sonora objeto de control.

Función de Transferencia: Modelo matemático que relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación.

Interfaz de Audio: Dispositivo electrónico capaz de capturar señales sonoras y hacer conversiones análogo- digital de las mismas para almacenarlas en un sistema computacional.

NPS: Nivel de presión sonora. Determina la intensidad del sonido que genera una presión sonora instantánea, se mide en dB variando de 0 a 140 dB.

Retardo de Grupo: Retardo temporal que se introduce en una señal de audio al ser procesada por un filtro, esto debido al proceso de filtrado.

Ruido Aleatorio: Tipo de ruido presente en algunos sistemas. Su principal característica es que no es posible hacer un análisis para predecir su comportamiento temporal o frecuencial, haciendo que éste sea de mayor complejidad que un ruido con características tonales.

Ruido Tonal: Ruido con mayor contenido energético en una frecuencia específica, la cual esta enmascara las frecuencias próximas a ella, haciéndolas poco perceptibles. En este tipo de ruido los armónicos de la frecuencia fundamental también están presentes en el espectro.

Sistema Adaptativo: En sistemas CAR, hace referencia a aquellos capaces de realizar cambios en su funcionamiento, con el fin de adaptarse a los cambios en las señales de entrada.

Sistema HVAC: Hace referencia a todo el sistema de ventilación, incluidos ductos y ventiladores, presente en algunos recintos.

Sonómetro: Dispositivo de medición sonora, el cual es utilizado para la obtención de datos relevantes dentro de los sistemas sonoros.

ANEXO A

MEDICIÓN DE LA FUENTE DE RUIDO Y SUS VARIABLES SEGÚN LA NORMA ISO 5128:1980

Sonómetro
Tipo 1:
RION NA27



Vehículo:
distancia
>20m a
objetos.



ANEXO B

CABINA VEHÍCULO FORD LASER 2001, SEDAN



ANEXO C

FUENTE DE RUIDO A CONTROLAR

Rejillas
A/C



ANEXO D

MONTAJE CARACTERIZACIÓN FUENTE DE RUIDO

Mic.
ECM8000



PC
Adobe Audition

Interfaz M- audio

ANEXO E

MONTAJE MEDICIÓN DEL CAMINO SECUNDARIO



Fuente
Secundaria:
Subwoofer
GD580



Mic. de error:
ECM8000

ANEXO F

ESTIMACIÓN DEL CAMINO SECUNDARIO CÓDIGO EN *MATLAB* (.m)

```
FsN=8000;

%Filtro limitador del ancho de banda:
%fir=fir1(675, [0.0125 0.0575]);

%% Leer señales Camino Secundario

% Señal excitación (u(n)) camino secundario -> Ruido Blanco 4seg 22:26

[WN,Fs] = wavread('WN2.wav');
WN=resample(WN,FsN,Fs);

%Limitar el ancho de banda de la señal u(n):
%WN=filter(fir,1,WN);

% Salida del camino secundario (d(n)) -> 4seg 22:26

[SP, Fs] = wavread('SP2.wav');
SP=resample(SP,FsN,Fs);

% Limitar el ancho de banda de la señal d(n):
% SP=filter(fir,1,SP);

%% Estimación del camino secundario: (tarea: identificación)

M = 750;
mu_S = 0.9;
offset_S = 1e-6;
coeffs = zeros(1,M);
h_S = adaptfilt.nlms(M,mu_S,1,offset_S,coeffs);
% leakage = 1
[yS,eS] = filter(h_S,WN,SP);

n = 1: length(SP);
figure(1)
plot(n,SP,n,yS,n,eS);
ylim([-1 1])
grid on
xlabel('Number of iterations');
ylabel('S(n)');
title('Secondary Path Identification Using the NLMS Adaptive Filter');
legend('Desired Signal','Output Signal','Error Signal');
```