

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE FILTROS DIGITALES PARA IMPLEMENTAR UN CONTROL ACTIVO DE RUIDO

DESIGN AND SIMULATION OF DIGITAL FILTERS TO IMPLEMENT AN ACTIVE NOISE CONTROL

Recibido: enero de 2012
Arbitrado: febrero de 2012

Nelson Felipe Rosas J.*, Manuel Fernando Anzola R.** , Marcel González R.***

Resumen

Este documento describe el diseño y simulación, utilizando el software Matlab, de tres tipos de filtros digitales: *Butterworth*, *Elíptico* y *Equiripple*, con el objetivo de determinar el filtro con las mejores propiedades para atenuar el ruido producido por el sistema de ventilación (HVAC), en un vehículo estándar, utilizando control activo de ruido (CAR).

Palabras clave

Control activo de ruido (CAR), Butterworth, elíptico, equiripple, sistema de ventilación (HVAC), Respuesta al impulso, respuesta finita al impulso (FIR), Respuesta infinita al impulso (IIR), Nivel de presión sonora (NPS), convolución.

Abstract

This paper describes the design and simulation using Matlab software of three types of digital filters: Butterworth, Elliptic and Equiripple. In order to determine the filter with the best properties to reduce the noise produced by the ventilation system (HVAC) in a standard vehicle, using active noise control (CAR).

Keywords

Active Noise Control (CAR), Butterworth, Elliptic, Equiripple, Ventilation System (HVAC), Impulse Response,

Finite Impulse Response (FIR), Infinite Impulse Response (IIR), Sound Pressure Level (NPS), Transfer Function, Convolution.

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 está expuesta 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 controlar [1]. Para frecuencias inferiores a 500 Hz se utiliza el control activo de ruido (CAR). [11].

* Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesor Catedrático Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, sede Bogotá. E-mail: nfrosas@unisalle.edu.co.

** Estudiante Ingeniería de Sonido. Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá. E-mail: manzola@academia.usbbog.edu.co

*** Ingeniero de Sonido. Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá. E-mail: mgonzalez@academia.usbbog.edu.co

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 frecuencias [11]. 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 solución [1], sin aumentar el consumo de combustible, ni ocupar de forma importante el espacio destinado a los pasajeros. Algunos trabajos realizados en esta temática son: [2]. [13]. [14]. [15].

Según estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [12] 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, esto ocurre cuando el tiempo de exposición es superior a 3 horas diarias y el nivel de presión sonora (NPS), es mayor a 65 dB. [10].

Este artículo presenta la caracterización de la fuente sonora y el diseño de tres filtros digitales, con el fin de modelar y posteriormente implementar, un sistema CAR para controlar el ruido producido por el sistema de aire acondicionado (HVAC) de un vehículo convencional. El proceso inicial consiste en caracterizar la fuente de ruido a controlar, para determinar factores como: su contenido energético, ancho de banda y variabilidad temporal, sin la influencia de ruido de fondo o reflexiones debidas al recinto (cabina del vehículo). Características que se deben tener en cuenta para determinar el filtro más adecuado a utilizar [3].

Posterior a la caracterización, se procede a la selección del filtro digital que se implementa en un sistema CAR, 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), pueden llegar a producir controles muy complejos de implementar o que requieran sistemas computacionales de gran poder, 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 atenuación [3].

Una forma para resolver este problema es realizar la comparación de distintos tipos de filtros digitales, que se puedan implementar en un sistema CAR. En esta sección se comparan dos filtros IIR (*butterworth*, elíptico) y un filtro FIR (*equiripple*), de distinta complejidad computacional, y se observa su influencia en el funcionamiento del sistema. En este artículo se presenta, el análisis realizado del comportamiento de los filtros en los siguientes aspectos: retardo de fase, respuesta en frecuencia, retardo de grupo y orden del filtro, para la fuente de ruido caracterizada evaluando su comportamiento en el sistema CAR [3].

I. Marco teórico

El diseño e implementación de un CAR requiere el análisis y manejo de algunos conceptos fundamentales, los cuales se presentan en esta sección.

A. Control activo de ruido

Consiste en la adición de una o más fuentes de sonido ubicadas en el área a controlar, las cuales 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 (CAR) 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 la atenuación. [1]. [2].

B. Filtro digital

Cumple una tarea principal en el procesamiento digital de señales, es usado para eliminar partes no desea-

das 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 análoga a digital, de tal forma que permite 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 análoga de la señal, como se observa en la figura 1. [9]. Los principales tipos de filtros digitales se muestran en la figura 2.

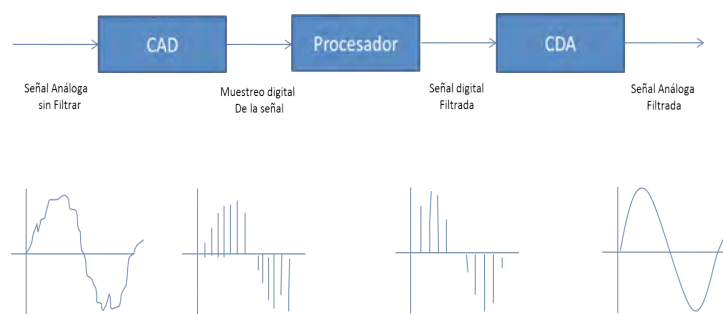


Figura 1. Proceso de filtrado de una señal análoga y sus tres fases: conversión análogo-digital, procesamiento de filtrado digital, conversión digital-análogo.

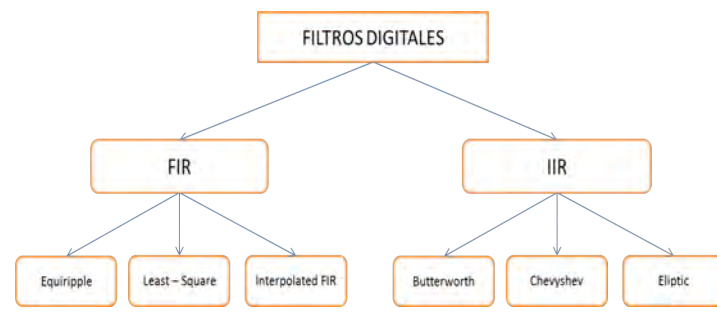


Figura 2. Principales filtros digitales, según su respuesta al impulso (finita o infinita) y métodos de diseño más usuales para cada uno de estos.

C. 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 solo presenta valores en los polos, es decir que únicamente tendrá elementos en el numerador de la función de transferencia. Presentando ventajas 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 audio. [3] [9].

D. 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 filtro. [3] [9].

E. Filtro de 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 (sólo con una caída de mayor pendiente). Necesita de un mayor orden para cumplir los mismos requerimientos, comparado con un Chevyshev o elíptico. [4]. Resultando en mayor costo computacional.

F. 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 diseño más eficiente, esto es, de menor orden. Por otra parte es el que presenta una fase menos lineal. [4].

G. 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). [5].

II. Desarrollo

El diseño del sistema de control activo de ruido se lleva a cabo siguiendo las etapas descritas en la figura 3. En este artículo se presentan los avances realizados en las 3 primeras etapas del proyecto.

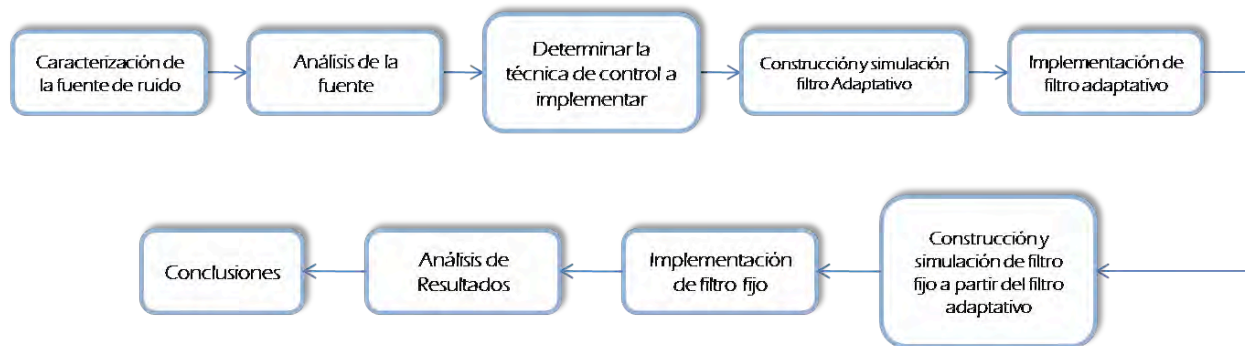


Figura 3. Principales fases para el desarrollo del proyecto de control activo de ruido.

A. Caracterización fuente de ruido a controlar

La primera etapa en el diseño del sistema CAR corresponde a la caracterización de la fuente de ruido, análisis que permite determinar la conveniencia de estos sistemas en la atenuación del ruido HVAC presente en la cabina del vehículo. 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 anecoica¹.

La obtención de los datos necesarios para la caracterización de la fuente se realiza siguiendo la norma ISO3382 [7], esta permite calcular el tiempo de reverberación en recintos. El método utilizado es la obtención de la respuesta al impulso, cuyos requerimientos son:

- Fuente impulsiva: 45dB, mayor al ruido de fondo.

¹ Señal totalmente libre de reflexiones acústicas, producidas por la proyección del sonido dentro del recinto.

- Posiciones de fuente: Representativas a las fuentes originales de ruido.
- Fuente omnidireccional: 125 - 4 khz.
- Micrófono omnidireccional: 125 - 4 khz.

Esta norma se utiliza para medir y estimar la respuesta al impulso de la sala $h(t)$, mediante la utilización de bombas calibre R12 como fuentes impulsivas, las cuales se

ubican simulando las rejillas de ventilación correspondientes a la fuente de ruido, (ver figura 5). Este impulso se graba utilizando un micrófono en la posición del conductor, espacio sonoro para el cual se obtiene la respuesta al impulso $h(t)$, como se presenta en el diagrama de bloques de la figura 4. En la figura 5 se presenta el montaje implementado para esta medición.

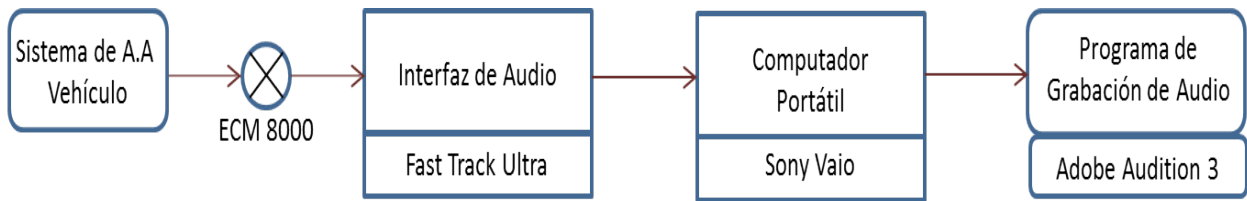


Figura 4. Método de medición utilizado para capturar tanto la respuesta al impulso del sistema $h(t)$ como la salida de este $y(t)$.



Figura 5. Estructura del sistema de medición para la caracterización de la fuente de ruido.

Adicional a esto, se realiza una grabación de la señal de ruido en la cabina del vehículo $y(t)$, la cual cuenta con componentes de la sala, los cuales se eliminan procesando la señal $y(t)$ y $h(t)$, como se muestra en la figura 6.

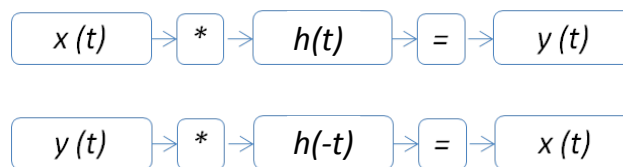


Figura 6. Gráfica superior: Proceso de convolución de un sistema, en el cual $x(t)$ corresponde a la señal anecoica; $h(t)$ es la respuesta al impulso; $y(t)$ es la salida del sistema. Gráfica inferior: Proceso de de-convolución aplicado para la obtención de $x(t)$.

De esta manera se garantiza que la señal de ruido tomada como referencia para este estudio es el ruido original de la fuente. Este se observa en la figura 7.

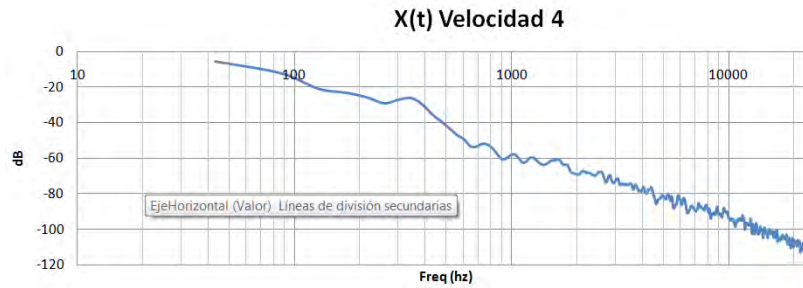


Figura 7. Respuesta en frecuencia de la señal de ruido objeto de estudio, se observa un nivel predominante en frecuencias bajas.

La comprobación del funcionamiento del sistema CAR se realiza midiendo el NPS que emite la fuente y comparándolo con el NPS resultante con el sistema CAR en funcionamiento.

Teniendo en cuenta que la fuente de ruido se encuentra al interior de un vehículo, la medición anteriormente descrita se realiza tomando como referencia la norma ISO5128:1980 [8], la cual hace posible obtener niveles de ruido, reproducibles y comparables al interior de vehículos, se requiere que la medición sea realizada teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Configuración del sonómetro en ponderación A.

- Ubicar el vehículo en un espacio libre de reflexiones laterales provenientes de construcciones cercanas.
- Posicionar el micrófono del asiento del conductor a máximo 15 cm y mínimo 2 cm de la posición del oído.
- Tomar como mínimo dos mediciones por posicionamiento de micrófono.

B. Implementación de filtros

Mediante el programa *Simulink* de *MATLAB*, se realiza un diagrama de bloques el cual contiene como entrada la señal de ruido de aire acondicionado caracterizada anteriormente, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz. Esta señal es procesada por cada uno de los filtros y su salida se desfasa en 180° , para luego ser almacenada en un archivo de audio con extensión (*.wav). Como se presenta en la figura 8.

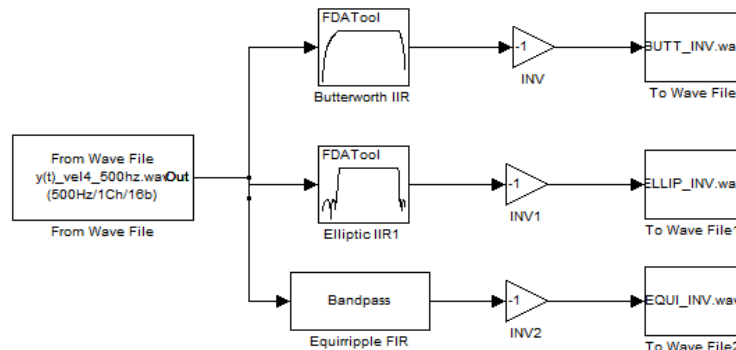


Figura 8. Procesos realizados para obtener la señal de salida filtrada e inversa en cada uno de los filtros a analizar.

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 a analizar

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 realiza el diseño de los filtros y se analizan 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.

C. Filtro IIR Elíptico. Mínimo orden posible: 17.

- Respuesta en frecuencia

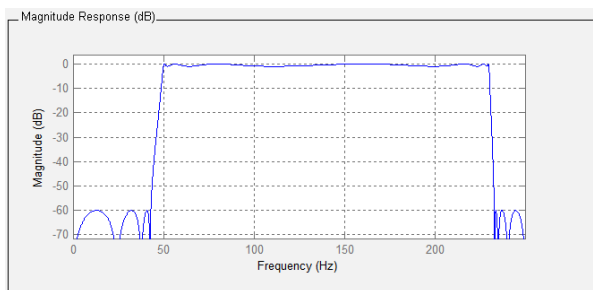


Figura 9. Respuesta en frecuencia del filtro elíptico: presenta una pendiente mayor hacia la frecuencia de corte 2, y un rizado no homogéneo en las bandas de atenuación.

- Respuesta en fase

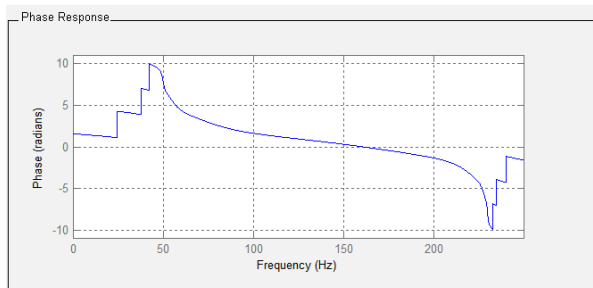


Figura 10. Respuesta en fase del filtro elíptico: se observa una respuesta no lineal en fase antes de la frecuencia de paso 1 y la frecuencia de paso 2.

- Retardo de grupo

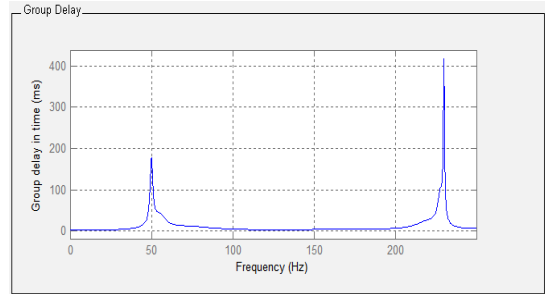


Figura 11. Retardo de grupo del filtro elíptico: la señal es retrasada 200 ms en la frecuencia de 50 Hz y más de 400 ms en la frecuencia de 230 Hz, con un ancho de banda reducido alrededor de estas.

D. Filtro IIR butterworth

Mínimo orden posible: 62.

- Respuesta en frecuencia

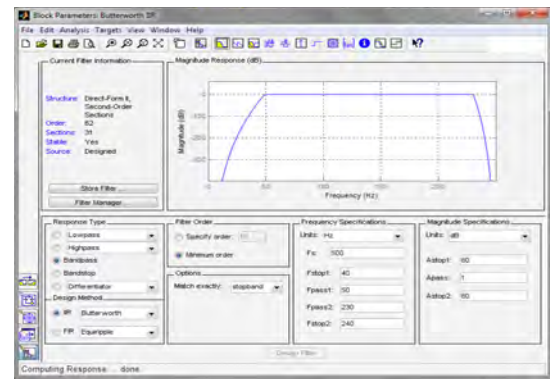


Figura 12. Respuesta en frecuencia del filtro butterworth: se observa una respuesta en fase plana tanto en la banda de paso como en la banda atenuada, teniendo un rizado irrelevante en estas.

- Respuesta en fase

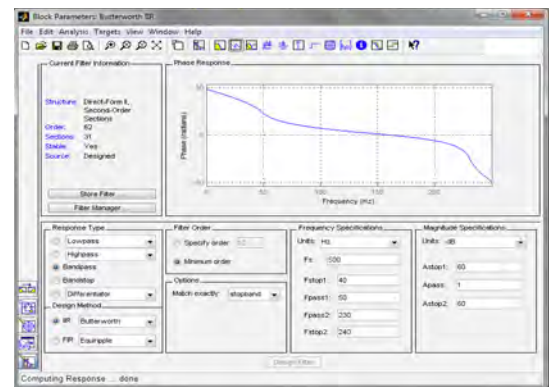


Figura 13. Respuesta en fase del filtro butterworth: se observa una respuesta no lineal en fase afuera de las frecuencias de corte, presentando un comportamiento más homogéneo en estas.

- Retardo de grupo

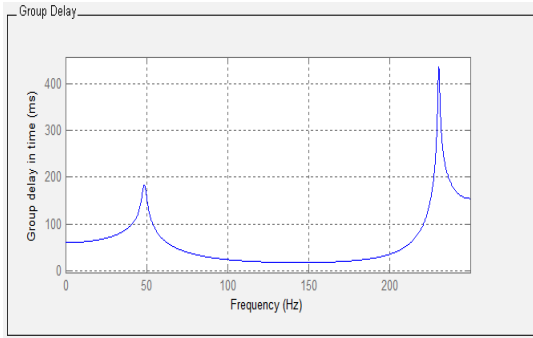


Figura 14. Retardo de grupo del filtro Butterworth: la señal es retrasada 200 ms en la frecuencia de 50 Hz y más de 400 ms en la frecuencia de 230 Hz, con un ancho de banda considerable alrededor de estas.

- Retardo de grupo

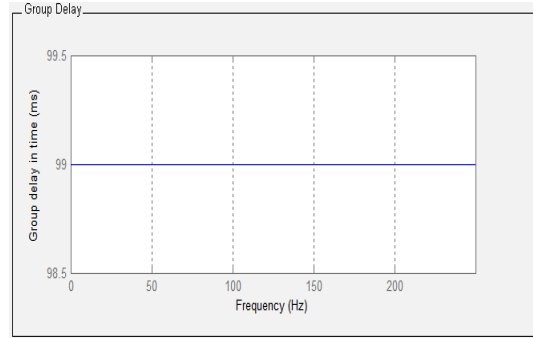


Figura 17. Retardo de grupo del filtro Equiripple: al ser un filtro FIR, su fase es lineal, por lo que el retardo de grupo se hace igual para todas las frecuencias, en este caso la señal es retardada 99 ms, constantemente a través del espectro.

E. Filtro FIR equiripple

Mínimo orden posible: 99

- Respuesta en frecuencia

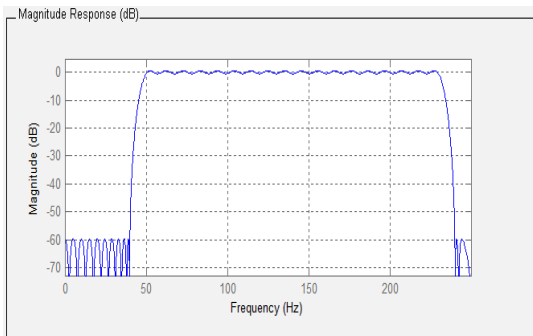


Figura 15. Respuesta en frecuencia del filtro Equiripple: presenta una pendiente igual en ambas frecuencias de corte, además de un rizado homogéneo antes y después de estas.

- Respuesta en fase

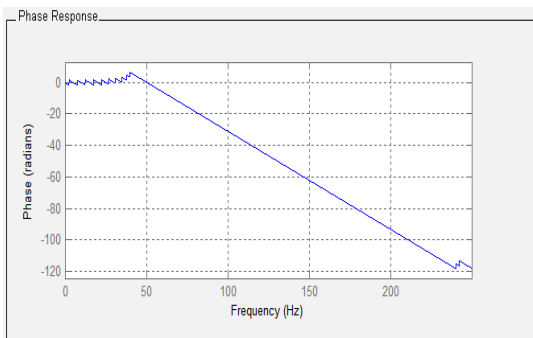


Figura 16. Respuesta en fase del filtro Equiripple: la fase es retrasada linealmente entre las frecuencias de corte.

Conclusiones

- El ancho de banda del sistema CAR a diseñar puede ser limitado efectivamente entre 50 y 230 Hz, esto debido a que en la caracterización de la fuente de ruido se observa un mayor contenido energético entre estas frecuencias (fig. 7), además, considerando que el control activo de ruido solo funciona bien en el margen de baja frecuencia [1], produciendo atenuación en un espacio de 1/10 de la longitud de onda, y teniendo en cuenta que entre más baja sea la frecuencia se necesitará de un sistema de altavoces de mayor dimensión para reproducirla adecuadamente [3].
- Como se observa en el análisis hecho sobre el orden de los filtros, 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 (fig.12), por lo tanto la amplitud de la señal no se ve afectada en el proceso de filtrado, lo cual si sucede en los filtros elíptico (fig. 9) y Equiripple (fig. 15).
- Se considera el filtro FIR Equiripple, el más adecuado para implementar en sistemas CAR, debido al retardo de grupo constante para todo el espectro de frecuencias (fig. 17), 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 (fig. 11) y butterworth (fig. 14).

Referencias bibliográficas

- [1] P. Cobo, T. Bravo, M. Cuesta, C. Ranz, y M. Sigüero. *Artículo: «Control Activo de Ruido»*. Instituto de Acústica CSIC. Madrid, España.
- [2] R. Schirmacher. «Active design of automotive engine sound». Audio Engineering Society (AES) E- Library. www.aes.org/e-lib/. Mayo de 2002.
- [3] P. Cobo Parra. «Control Activo de Ruido». Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid: 1997.
- [4] J. C. Ramírez Nuño. «Clasificación de los Filtros por su respuesta». Universidad de La Salle Bajío. México: Mayo de 2003.
- [5] Bores Signal Processing. Introduction to DSP - filtering: design by equiripple method. www.bores.com/courses/intro/filters/4_equi.htm
- [6] J. E. San Martín. Filtros: Distorsión de fase. Argentina: Mezcla y Masterización, Facultad de Bellas artes UNLP. www.astormastering.com.ar/Clase_4_Filtros_Distorsion_de_fase.pdf
- [7] International Organization of Standardization- ISO. «ISO3382-2:2008 Acoustic- Measurement of room acoustic parameters- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms». www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=36201
- [8] International Organization of Standardization- ISO. «ISO51281980 Acoustics- Measurement of noise inside motor vehicles». www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=11127
- [9] Enciclopedia virtual Duiops. www.duiops.net/hifi/enciclopedia/filtro-digital.htm
- [10] S. García Ochoa. «Ruido en el tráfico es causa de estrés, ansiedad, agresión e irritabilidad». Organización Editorial Mexicana. 23 de septiembre de 2010. www.oem.com.mx/laprensa/notas/n1791191.htm.
- [11] D. La Rosa Macedo. Estudio y Simulación de Protectores Auditivos para la Atenuación del Ruido Generado por un Martillo Neumático Aplicando Control Activo de Ruido. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima: septiembre de 2008.
- [12] Organización Mundial de la Salud –OMS–. www.who.int/publications/es/
- [13] Hiroyuki Hashimoto, Isao Kakuhari. «Active Control System for Low Frequency Road Noise Combined with an Audio System». Audio Engineering Society (AES) E- Library. www.aes.org/e-lib/. Septiembre de 2001.
- [14] F. Cotana, F. Rossi, C. Buratti. «Active Noise Control Technique for Diesel Train Locomotor Exhaust Noise Abatement». 144.º Congreso de la Sociedad Americana de Acústica (ASA).
- [15] Enrique Masgrau, Alfonso Ortega, Pedro Ramos, Luis Vicente, Eduardo Lleida. «Tratamiento robusto del sonido en el interior de vehículos». Grupo de Tecnologías de la Comunicaciones (GTC). Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Universidad de Zaragoza.



UNIVERSIDAD DE
SAN BUENAVENTURA
SEDE BOGOTÁ

Calidad humana y profesional

Ingeniería de Sistemas



CÓDIGO SNIES 2520
TÍTULO QUE OTORGA Ingeniero(a) de Sistemas
METODOLOGÍA Presencial
DURACIÓN 10 semestres

Objetivo del programa
 Formar Ingenieros de Sistemas con las competencias y habilidades para investigar, innovar, analizar, diseñar, construir, implementar y brindar soluciones informáticas en los diferentes sectores de la sociedad.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, SEDE BOGOTÁ - Carrera 8 H n.º 172-20 • PBX 667 1090 • Línea gratuita nacional: 01 8000 125 151
 Correo electrónico: informacion@usbog.edu.co • www.usbbog.edu.co
 FACULTAD DE INGENIERIA • Edificio Fray Diego Barroso, oficina 201 • PBX: 667 1090 extensiones 275 - 258