

Aplicación y comparación de sistemas de filtrado digital con el fin de aplicarlo a audífonos electrónicos atenuadores para población con TEA

Guido Besozzi

Resumen—En el siguiente paper se trabajó continuando una investigación previa sobre alternativas para tratar las alteraciones auditivas que posee la población con trastorno del espectro autista (TEA). En el trabajo anterior se llegó a la conclusión de que sería muy favorable en la vida cotidiana, de una persona con TEA, el uso de audífonos con cancelación de ruido y replicación del ambiente auditivo, pero deberían ser reguladas frecuentemente según las capacidades del individuo. Continuando dicho trabajo se analizó la viabilidad de un sistema con distintos tipos de filtros digitales. En este trabajo brindaremos muestras que aplicándolas en la plataforma de Matlab nos permitirá demostrar un caso práctico de uso de distintos tipos de filtrado digital, como también comprender los algoritmos adaptativos que trabajan en ellos y sus variables.

Palabras Clave: Filtros adaptativos, cancelación de ruido, algoritmo LMS, autismo, TEA.

NOMENCLATURA

<i>Criterio LMS</i>	Last Mean Squares: Mínimos Cuadrados Medios.
<i>DPS</i>	Procesadores Digitales de Señal.
<i>TEA:</i>	Trastorno del Espectro Autista.
<i>ADC:</i>	Convertidor Analógico Digital.
<i>DAC:</i>	Convertidor Digital Analógico.
<i>Filtros IIR:</i>	Filtros de respuesta infinita al impulso.
<i>Filtros FIR:</i>	Filtros de respuesta finita al impulso.
X_k :	La Señal de entrada.
t :	El tiempo.
W^t :	El conjunto de los coeficientes.
y_k :	La señal de salida del filtro.
d_k :	La señal deseada.
e_k :	El error en el instante 'k'.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se llevó a cabo la investigación y realización de pruebas sobre filtros adaptativos en sonido, con el fin brindar una solución a la problemática de hipersensibilidad auditiva que presenta un alto porcentaje de la población con trastorno del espectro autista (TEA). Esto sería posible mediante unos audífonos que permitirán atenuar los decíbelles de ingreso al sistema auditivo del individuo (audífonos electrónicos atenuadores de ruido), y sería posible replicar el sonido en una intensidad que sea aceptable para la persona que lo utilizara, esta configuración deberá ser regulada en el tiempo con un especialista de sonido que tenga contacto con el individuo. Dicho sistema sería posible mediante la implementación de los filtros a estudiar en un procesador que posea el

audífono electrónico. Para analizar la factibilidad de utilizar estos filtros en unos audífonos electrónicos atenuadores, se implementará el sistema en un ambiente de prueba de Matlab.

II. CASO DE ESTUDIO

Este trabajo es referencial a un proyecto de investigación anterior[1], en el que el objetivo era el de analizar la factibilidad de diseñar un dispositivo de modulación auditiva con el fin de facilitar las actividades diarias de la población con trastorno del espectro autista que sufra de Hipersensibilidad auditiva (Hiperacusia). El objetivo del proyecto actual será el de continuar con el desarrollo anterior, pero focalizándonos en aplicar y comprobar la factibilidad del uso de un filtro adaptativo LMS para su aplicación en un protector auditivo electrónico que permita la modulación de las frecuencias altas, medias y bajas, según los índices de atenuación específicos de cada individuo. Para esto deberemos comprobar cómo trabajan sus algoritmos, condiciones y parámetros. Con el fin de simularlos en Matlab® para generar resultados comprobables.

III. MARCO TEORICO

Matlab® es un sistema de cómputo numérico (Matricial Laboratory) que ofrece un ambiente de desarrollo matemático que nos permitirá obtener una simplificación de los componentes y funciones tanto matemáticas como físicas, como también nos permitirá la simulación de dichos componentes en distintos ámbitos (que serán generados como situaciones en las que se usara el dispositivo), con el fin de poder utilizarlo para realizar una comparación de algoritmos de filtros digitales. Matlab® nos permitirá generar, de forma rápida y eficiente, un ambiente adecuado para mostrar los resultados obtenidos en la simulación. Y nos permitirá mediante su interfaz gráfica (GUI) manipular de forma fácil y cómoda los parámetros de interacción con el filtro digital programado. La realización de GUIs en Matlab® es bastante similar a los lenguajes de programación visuales como Visual Basic, C#, etc.

III-A. Filtros

El termino filtro es definido como cualquier sistema que discrimina o modifica lo que pasa a través de él de acuerdo con algún atributo de la entrada. Estos son selectores/transformadores de frecuencia, los que permiten que circulen las señales que se encuentren dentro de un dominio de bandas de frecuencias aceptado, y discriminan las señales que no se encuentren en dicho dominio. Para este trabajo nos

encontraremos utilizando filtros digitales, que se caracterizan por realizar su función mediante algoritmos numéricos. El procesador tendrá almacenado un algoritmo numérico para realizar dicho filtro, a estos procesadores se los llama procesadores digitales de señal (DSP)[2], el proceso se realiza mediante el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 1.

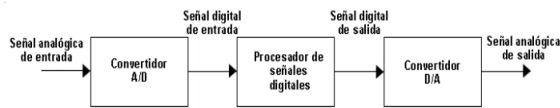


Figura 1. Diagrama de bloques de un filtro digital.

III-B. Funcionamiento de filtros

El proceso de funcionamiento de un filtro digital es el siguiente:

1. Ingresamos una señal analógica que será muestreada y digitalizada utilizando un convertidor analógico digital (ADC), como resultado tendremos una representación en números binarios de los valores sucesivos muestreados de la señal de entrada analógica.
2. Se transfiere la transformada antes nombrada a el procesador, y este se encontrará efectuando operaciones matemáticas sobre estos datos, como podrían ser, desde suma de productos hasta funciones logarítmicas, con el fin de brindar un resultado a la salida.
3. Estos resultados calculados que representan valores muestreados de la señal filtrada, serán enviados a un DAC (convertor digital analógico) con el fin de devolver la señal a su forma original audible.

El proceso de un filtro digital puede verse en Figura 2.

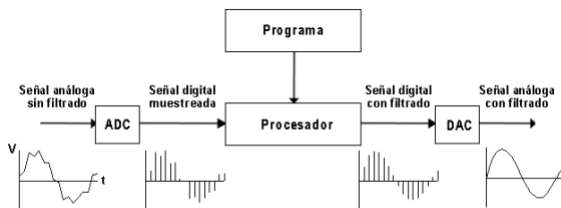


Figura 2. Proceso de filtro digital.

III-C. Clasificación de los filtros

Existen distintas clases de filtros digitales, los que nos interesaran son:

- Filtros IIR: Filtros de respuesta infinita al impulso: Son los filtros digitales en los que la respuesta es una función de las muestras de la señal de entrada presente y las señales pasadas, más las de las muestras de salidas anteriores. Ante una entrada impulsiva las muestras de salida no son nulas teniendo al infinito.[3]
- Filtros FIR: Filtros de respuesta finita al impulso: En dichos filtros la muestra de salida depende únicamente de la muestra de entrada presente y de un numero finito de muestras de entradas pasadas. Los coeficientes que

maneje el filtro FIR, son iguales a los valores que tomara sucesivamente la respuesta impulsiva del mismo. Como su nombre lo indica, si la entrada es una señal impulso, la salida tendrá un numero infinito de términos no nulos, es decir, nunca volverá al reposo.[2]

■ Filtro Adaptativo:

Estos filtros son sistemas que varían en el tiempo, adaptándose a cambios en su entorno y así optimizando su funcionamiento mediante un conjunto de algoritmos conocidos como algoritmos adaptativos. La forma de determinar el comportamiento óptimo del filtro adaptativo es minimizando una función monótona creciente de la señal o secuencia de error. esta secuencia se definirá como la diferencia entre una señal que se toma como referencia o señal deseada, y la salida de dicho filtro adaptativo. Como conclusión, para diseñar un filtro adaptativo deberemos determinar la regla de variación de coeficientes para ajustar las señales a las deseadas, el resto de los ajustes se realizarán automáticamente. De igual manera deberemos tener en cuenta que para nuestro caso vamos a tener que filtrar distinto según la característica de la señal de entrada, debido a esto el filtro deberá tener caminos de acción distintos para trabajar con señales altas, o bajas.[2]

■ Filtro por frecuencia de corte:

- Filtro pasa-bajas: Permitirá el paso de las frecuencias bajas y detiene las frecuencias elevadas.
- Filtro pasa-altas: Permitirá el paso de altas frecuencias y rechaza las frecuencias bajas.
- Filtro pasa-banda: Permitirá el paso de frecuencias dentro de una banda de frecuencia y bloquea o atenúa las frecuencias fuera de la banda.
- Filtro rechaza-banda: Permite el paso de frecuencias fuera de una banda de frecuencia y bloquea o atenúa frecuencias dentro de la banda.

III-D. Algoritmos Adaptativos

Son algoritmos de optimización cuyo objetivo es el de obtener los parámetros que minimicen algún criterio preestablecido, en nuestro caso el criterio será la minimización de la señal capturada en su límite aceptable de cancelación. Estos algoritmos tienen distintos tipos de criterios:

III-D1. Criterio LMS: Last Mean Squares:

El algoritmo LMS (o Mínimos Cuadrados Medios) es un método de cálculo especialmente utilizado en aplicaciones de procesamiento de señales en las que la velocidad de cálculo es

alta, se trata de la aplicación de un filtro. Este algoritmo es utilizado en filtros adaptativos para encontrar los coeficientes del filtro que permitirán obtener el valor mínimo esperado del cuadrado de la señal de error, que será la diferencia entre la señal deseada y la señal producida por el filtro. LMS pertenece a la familia de los algoritmos de gradiente estocástico, es decir que el filtro se adaptara en base a él gradiente de la tendencia estadística que se producirá al relacionar la señal a filtrar con la señal ruido.[4]
El algoritmo LMS es un algoritmo de filtrado lineal adaptativo que consiste de dos procesos básicos:

- Un proceso de filtrado:
 - Es el proceso en el cual se filtra la señal de entrada, para esto calcula la salida generada por un filtro transversal, y la generación del error comparando la salida dicha con la respuesta deseada.
 - Generar una estimación del error por la comparación de la salida y la respuesta deseada.
- Un proceso adaptativo: el cual involucra el ajuste automático de los valores de los coeficientes del filtro, de acuerdo con la estimación del error.

Así, que la combinación de estos dos procesos constituye un lazo de realimentación alrededor del algoritmo LMS.

III-D2. Ecuaciones utilizadas en algoritmo LMS:

- Señal de entrada:
 $X_k: X_k = [x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{lk}, \dots, x_{nk}]^t$ sientio 't' el tiempo
- El conjunto de los coeficientes:
 $W^t = [w_1, w_2, \dots, w_l, \dots, w_n]$
- El error en el instante k:
 $e_k = d_k - y_k = d_k - W^t X_k$

siendo d_k la señal deseada y y_k la señal de salida del filtro.

- El algoritmo actualizará los coeficientes realizando cambios de forma proporcional al gradiente, definiendo el gradiente como la derivada del cuadrado del error con respecto a cada uno de los coeficientes:

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k + \mu(-\hat{\nabla}_k) \\ \hat{\nabla}_k &= -2e_k X_k \\ W_{k+1} &= W_k + 2\mu e_k X_k \end{aligned}$$

Siendo esta última (W_{k+1}) la ecuación que rige el algoritmo LMS. Será la ecuación que busca minimizar la potencia de la señal de error[5].

III-D3. Sistemas dinámicos desconocidos: Se le llama sistemas desconocidos cuando la señal de ruido es desconocida, y esta colacionada en nuestra señal a filtrar, podría ser porque poseemos tan solo un sensor, ó no tenemos forma de discriminarla.

La solución para estos tipos de sistemas es la de obtener

nuestra señal deseada aplicando un retardo a la señal de entrada, donde los coeficientes del filtro adaptativo se auto ajustan mediante el algoritmo que minimizara el error cuadrático medio.

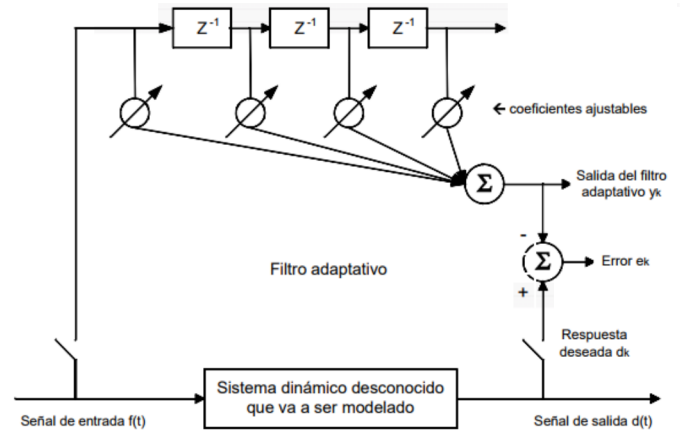


Figura 3. Diagrama de sistema dinámico desconocido.

III-D4. Variables importantes en filtros FIR: Hay 3 variables importantes que ajustar

- La longitud del filtro FIR (que sera el numero de coeficientes).
- El valor de retardo de la señal de error, para sistemas del tipo desconocido utilizara un valor típico de 50.
- El tamaño del paso de convergencia de μ , valor típico de 0,002.

IV. DESARROLLO

IV-A. Solución planteada

Partiendo de la problemática de sensibilidad auditiva que planteamos en el principio, sabemos que para cada individuo tendremos distintos tipos de características y que el dispositivo deberá ser configurable por un especialista de sonido que conozca dichas características. Entonces nuestro sistema deberá permitir modificar la forma de cálculo según el tipo de señal que ingresará y las capacidades del individuo en ese momento. Por ejemplo: Deberá tener un procesamiento por frecuencia distinto una persona con sensibilidad auditiva x en frecuencias altas, y r frecuencias bajas.

Para esto debemos plantear una solución de cálculo distinta discriminando los tipos de señal. Una posible solución a esta problemática es dividir el sistema por filtros de corte y trabajar con un filtro LMS diferenciando por cada frecuencia de corte. Entonces tan solo con permitir modificar cierto coeficiente clave en cada algoritmo LMS nos permitirá esto, dicho coeficiente será el μ .

ejemplo de configuración filtro pasa-baja: Sabemos que el ancho de banda útil de la voz es de 8 KHz, pero que la información relevante está contenida hasta los 4 KHz. Entonces para una configuración inicial, en la que lo importante será la comunicación, tendremos el filtro de pasa-bajas con el fin de eliminar la información en frecuencias superiores a 4KHz y el filtro LMS con un μ según los parámetros aceptados por

el individuo, así cambiando la velocidad de adaptación de los coeficientes. y así para el resto de los filtros por frecuencia de corte.

IV-B. Diagrama LMS en Simulink

Se realizó el diagrama en Simulink que es una de las múltiples aplicaciones que brinda Matlab, como podemos ver en la Figura 4.

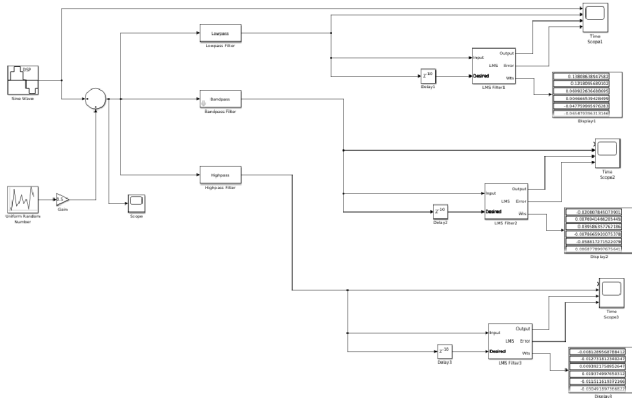


Figura 4. Diagrama de sistema desarrollado en Simulink.

Aquí fuimos generando el sistema deseado, comenzando por la generación de la señal senoidal de entrada con una frecuencia de 50 Hz, como podemos ver en la figura 5 y figura 6.

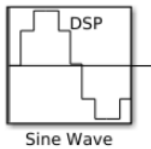


Figura 5. Simbología de Señal de entrada en Simulink.

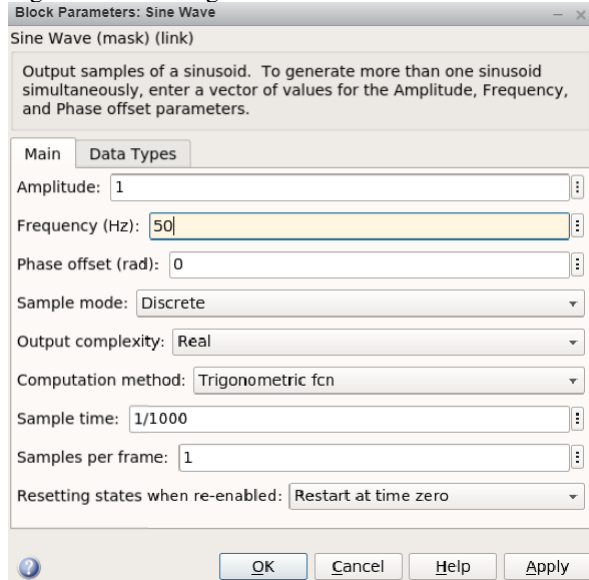


Figura 6. Configuración Señal de entrada.

Luego generamos el ruido a través de un Numero aleatorio uniforme con una ganancia de 0.5, posterior a esto combinaremos, a través de un bloque de suma, la señal de entrada senoidal con el ruido. Como podemos observar en la figura 7 y 8. Y como consecuencia generaremos la señal de entrada con ruido.

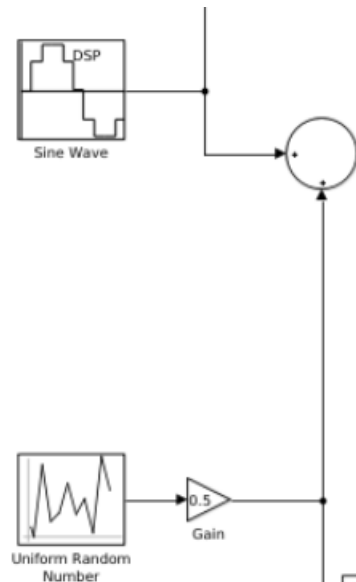


Figura 7. Simbología de Señal Ruido en Simulink + operador SUM con la señal de entrada senoidal.

Como parámetro del generador de ruido aleatorio, tendremos mínimos, máximos, semilla y tiempo de muestra. El tiempo de muestra ingresado será de 0.001 como se puede ver en Figura 8, esto es para genere un valor aleatorio cada 0,001 segundos.

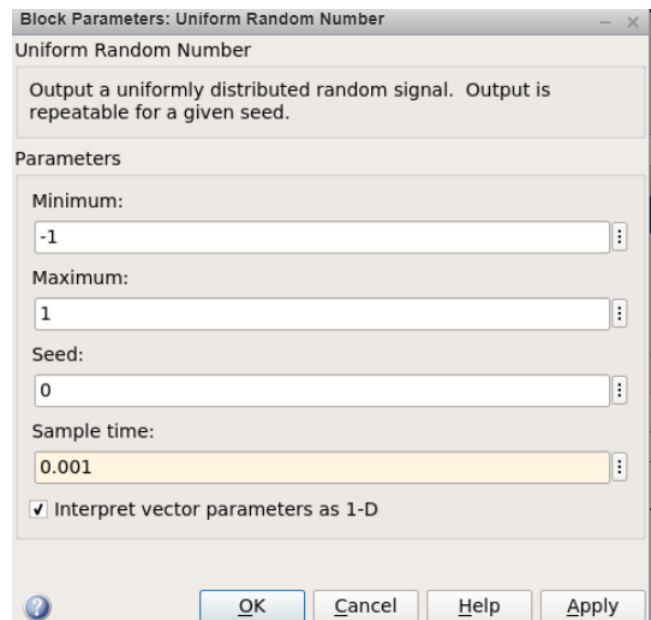


Figura 8. Configuración parámetros de ruido.

Posterior a la generación de nuestra señal de entrada, tendremos que manipular de distinta forma según las características que tenga, para esto realizaremos distintos tipos de manipulación de señal, teniendo así un filtro pasa-bajas, pasa-altas y pasa-banda, estos pudiendo ser configurados para los rangos deseados del individuo a utilizar el dispositivo o el ambiente donde se encuentre. Como podremos ver en figura 9.

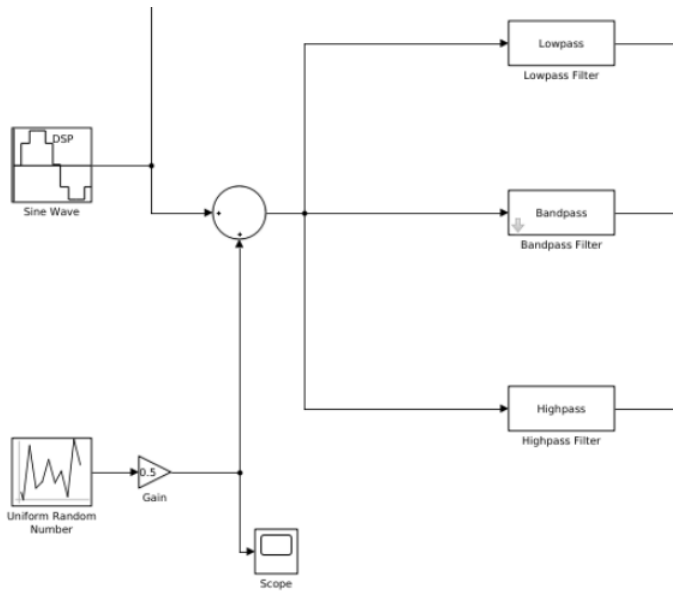


Figura 9. Diagrama de filtros por frecuencia de corte en Simulink.

Cada uno de estos filtros tendrá una configuración para las características de la señal, las cuales son:

- Banda de parada de frecuencias (Hz).
- Banda de paso de frecuencias (Hz).
- Banda de parada de atenuación (dB).
- Banda de paso de onda (dB).

Estas características nos permitirán permitir o frenar las frecuencias y/o magnitudes que puedan ser nocivas para el individuo con Hipersensibilidad auditiva. Podemos ver las características antes nombradas para los filtros de frecuencia de corte en las figuras 10, 11 y 12.

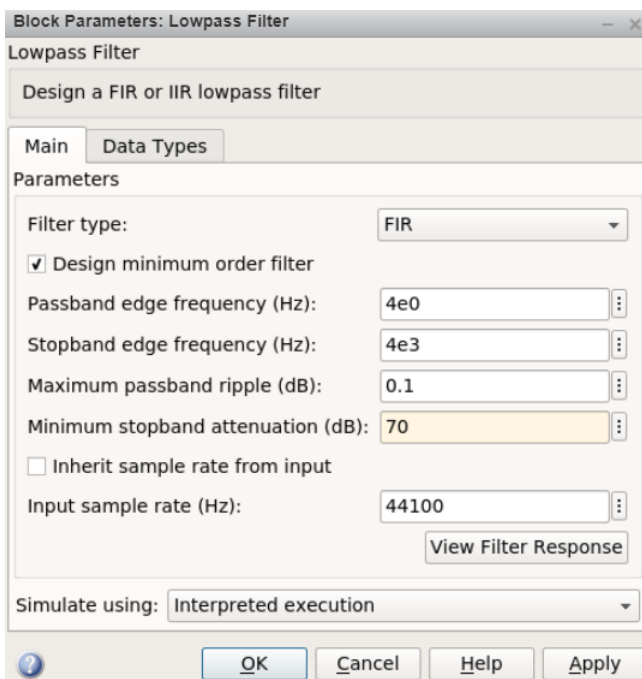


Figura 10. Parámetros para filtro pasa-bajas.

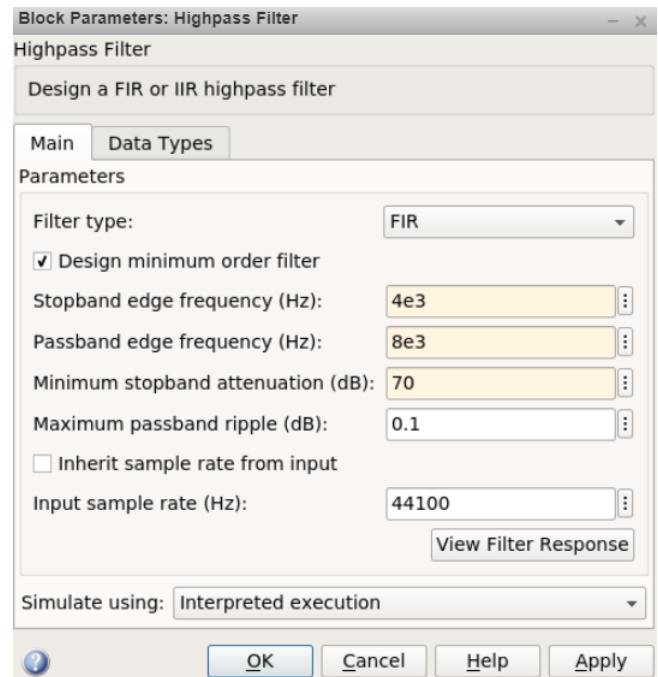


Figura 11. Parámetros para filtro pasa-altas.

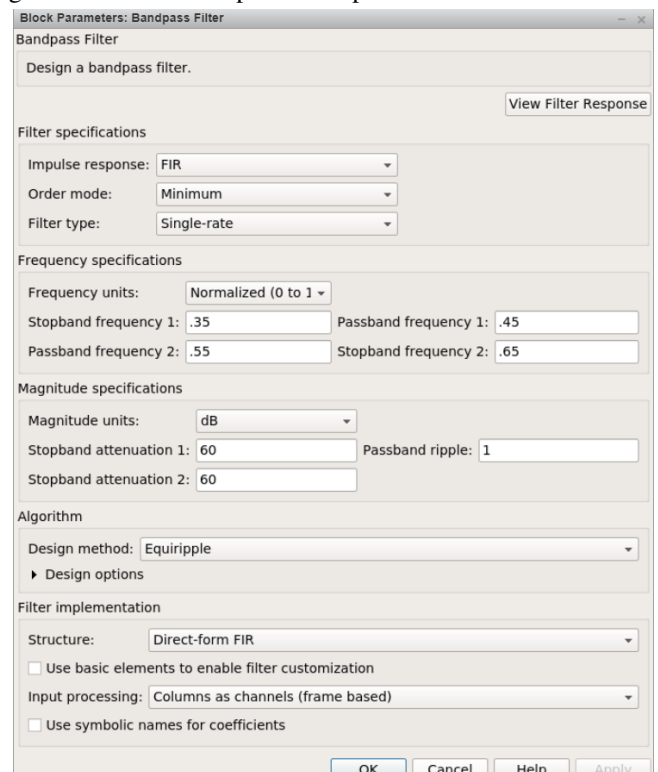


Figura 12. Parámetros para filtro pasa-banda.

Posterior al filtrado por frecuencia de corte, la señal se dirige hacia el filtro adaptativo LMS, cada filtro por frecuencia de corte tendrá su filtro LMS diferenciado, debido a que el tratamiento para señales por el filtro LMS, trabajará y aprenderá mejor si trata con casos similares de amplitud y frecuencia.

Antes de acceder al filtro LMS tendremos un retardo de señal, según la cantidad de muestras que serán suficientes para que el sistema conforme su aprendizaje (como podemos ver en la figura 13, el retardo utilizado es a 10 muestras). Entonces

también según el tipo de salida de filtro de frecuencia de corte, tendremos distintos tipos de retardo, debido a que no será el mismo tipo de aprendizaje para señales que vengan de pasabajas que los que vengan por pasa-altas.

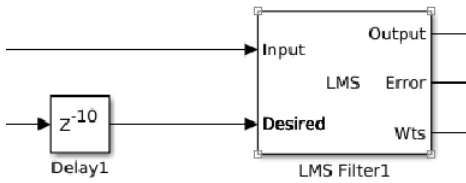


Figura 13. Parámetros de Retardo y entrada a filtro LMS en Simulink.

La configuración del filtro LMS, será en base a el largo aceptable del filtro y el μ , que para este caso lo utilizamos en 0,002.

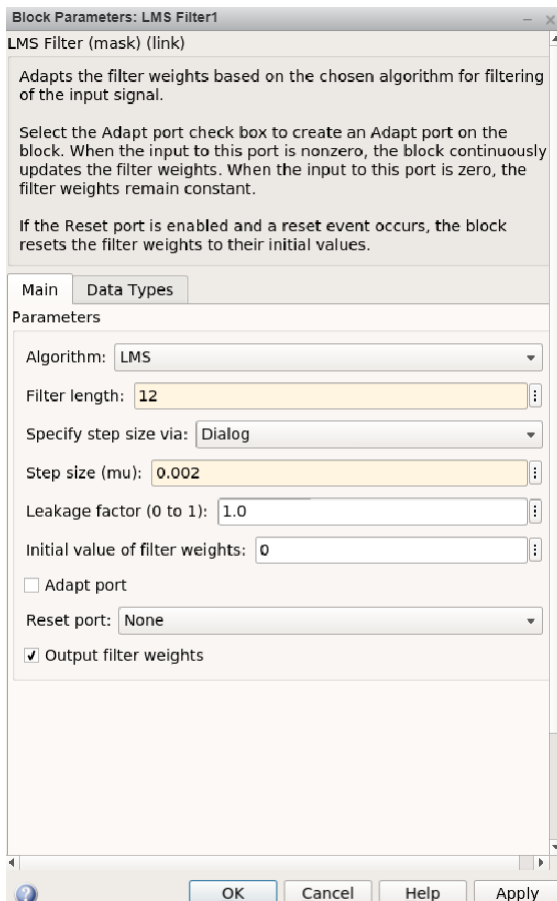


Figura 14. Configuración de parámetros para filtros LMS.

Luego las salidas del filtro LMS irán a un display, el cual mostrara: el número y valores de los coeficientes. y a un time scope, que mostrara la señal de entrada al filtro, la salida del mismo y el error. Como también se incluyó un time scope de la señal de entrada mezclada con el ruido para poder confirmar el funcionamiento de los filtros.

Primero veremos la señal generada en conjunto con el ruido en la Figura 15.

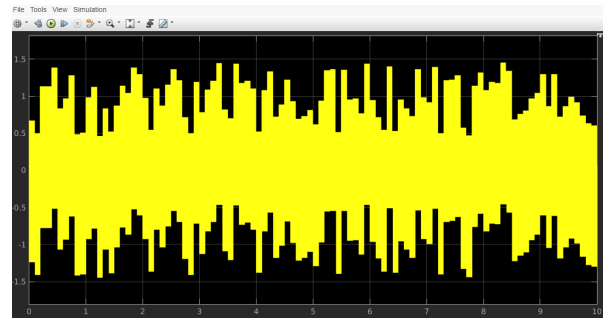


Figura 15. Señal de entrada con ruido.

Luego veremos cómo actua dicha señal pasando por el filtro pasa-bajas, como podemos observar en la figura 16, a partir de los 0,002 segundos comienza a aplicarse el filtro, esto debido a la configuración del μ [6]. Podremos observar cómo trabaja el filtro en la señal con color verde.

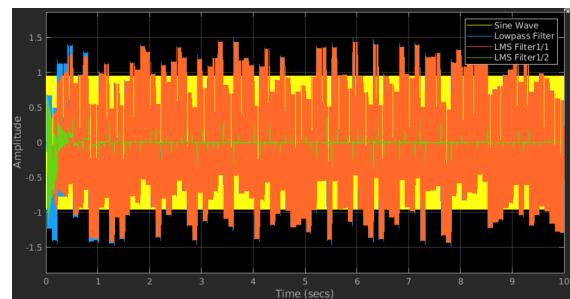


Figura 16. Salida del Filtro pasa-bajas y filtro LMS.

Ahora veremos cómo trabajaron los filtros pasa-banda y los pasa-altas, como puede verse en las figuras 17 y 18.

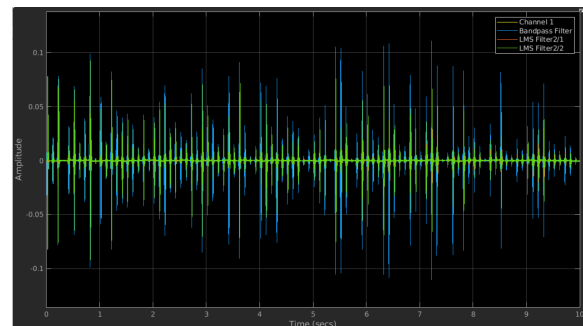


Figura 17. Salida del Filtro pasa-banda y filtro LMS.

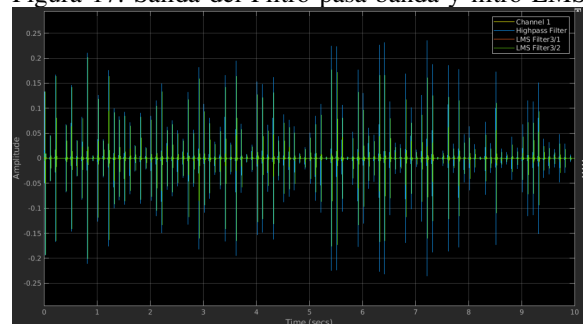


Figura 18. Salida del Filtro pasa-altas y filtro LMS.

Como podemos observar el filtro trabaja de distinta manera según las configuraciones realizadas en los filtros de paso de frecuencia, y en este caso para estas señales de entrada, el

filtro pasa-altas permite el paso de amplitudes menores que le filtro pasa banda.

V. CONCLUSIÓN

Llegamos a la conclusión que mediante el filtro LMS no es posible regular según los índices de atenuación específicos de cada individuo, pero si pudimos utilizarlo para la cancelación de ruido. De igual manera fue posible regular los niveles de señal que deseamos descartar mediante filtros anteriores pasa-bajas, pasa-altas y pasa-banda. La idea de este sistema es que la señal de salida elegida para su uso será la que trabaje con el filtro que sea más significativo según la señal de entrada y según las características configuradas para el individuo con el que vaya a relacionarse, pudiendo configurar los filtros según sus diferencias sensoriales o el entorno donde se encuentre.

Como conclusión podemos apreciar que en el algoritmo converge idealmente muy rápido para valores de μ altos, sin embargo si existe ruido los resultados de convergencia se quedan en peores niveles cuando μ es mayor, empeorando la identificación[7]. Al contrario, cuanto menor sea el factor de convergencia, requiere más iteraciones para alcanzar o mejorar la adaptación del filtro siendo además más estable. El factor de convergencia del algoritmo μ determinará la velocidad de convergencia del filtro adaptativo siendo a su vez directamente proporcional con el desajuste o remanente del error respecto al caso ideal. Por esto debe de existir un compromiso entre tiempo que dedica el algoritmo LMS y el nivel de convergencia al que se pueda llegar.

VI. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Podría aplicarse fácilmente, a este tipo de solución, distintas configuraciones en el dispositivo auditivo. así pudiendo tener filtrados particulares según los distintos ambientes sonoros donde el individuo pueda encontrarse, como:

- Hogar.
- Ambientes internos.
- Ambientes externos.
- Espectáculo.
- Calle.
- Interior de automóvil.

VII. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

REFERENCIAS

- [1] G. Besozzi, "Audífonos electrónicos atenuadores para población con tea," 2020.
- [2] R. Vázquez-Machorro, A. Reyes-Cruz, and J. Atonal-Sánchez, "Comparación de filtros digitales en matlab para implementación en un fpga," *Científica*, vol. 18, no. 2, pp. 71–77, 2014.
- [3] N. R. Córdova Álvarez and M. A. Ayala Velasco, "Diseño e implementación de un filtro con algoritmo adaptativo en fpga para la cancelación de ruido." B.S. thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2016., 2016.
- [4] B. Morcego and M. Cugueró-Escofet, "Comparación de implementaciones en c y matlab de filtros adaptativos para dsp," 09 2001.
- [5] W. Zelaya, "Diseño de un filtro digital adaptativo como cancelador de ruido basado en el algoritmo lms," *Universidad del Salvador*, 2004.
- [6] A. M. Olivares, "Ingeniería avanzada para sistemas de control de ruido acústico mediante técnicas adaptativas," *Teses de Doutorado*, 1998.
- [7] C. S. Palacios and S. L. Romero, "Calibración automática en filtros adaptativos para el procesamiento de señales emg," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 16, no. 2, pp. 232–237, 2019.

VIII. CV

Guido Besozzi Analista de sistemas, expedido en 2019 por la Universidad de Palermo.

Alumno de Ingeniería en informática de la Universidad de Palermo.