

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Deconvolución acústica para grabación en ambientes no tratados.**

Trabajo de graduación presentado por José Luis Méndez Cardenas para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2020







Deconvolución acústica para grabación en ambientes no  
tratados.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Deconvolución acústica para grabación en ambientes no  
tratados.**

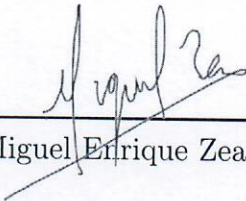
Trabajo de graduación presentado por José Luis Méndez Cardenas para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

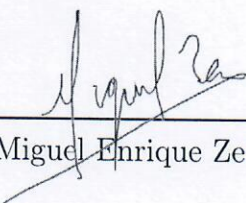
2020



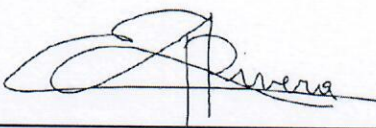
Vo.Bo.:

(f)   
MSc. Miguel Enrique Zea Arenales

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
PHD. Luis Alberto Rivera

Fecha de aprobación: Guatemala, 15 de junio de 2020.



Se le agradece a la Universidad del Valle de Guatemala por brindar los conocimientos de ingeniería para el desarrollo de este proyecto. Del mismo modo se agradece el seguimiento de MSc. Carlos Esquit por su apoyo como director de carrera y velar porque se cumplieran las destrezas y competencias de la carrera de ingeniería electrónica. También se le agradece a MSc. Miguel Enrique Zea Arenales por su apoyo como asesor, brindando su conocimiento y seguimiento como un soporte crítico para lograr los resultados de este proyecto.



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xi</b>
<b>Resumen</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Convolución relevante para estimación de fuente acústica. . . . .	3
2.2. Filtros adaptativos de Volterra para cancelación acústica no lineal. . . . .	4
2.3. Herramientas para encontrar respuesta al impulso de una habitación. . . . .	6
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Alcance</b>	<b>11</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>13</b>
6.1. Convolución . . . . .	13
6.2. Reverberación . . . . .	13
6.2.1. Aproximación de un filtro digital de reverberación . . . . .	13
6.3. Respuesta al impulso mediante barrido de frecuencias sinusoidales . . . . .	14
6.4. Deconvolución ciega . . . . .	15
6.5. Identificación de sistemas . . . . .	15
6.6. Filtros adaptativos . . . . .	15
6.6.1. Filtro adaptativo LMS . . . . .	16

6.6.2. Filtro adaptativo de Volterra de segundo orden LMS . . . . .	17
<b>7. Obtención de señales de audio</b>	<b>21</b>
7.1. Equipo utilizado para obtención de señales . . . . .	23
7.2. obtención de respuesta al impulso de la habitación . . . . .	25
<b>8. Deconvolución mediante procesamiento de señales con distintos métodos</b>	<b>27</b>
8.1. Dereverberación utilizando función "deconv" de Matlab . . . . .	27
8.1.1. Resultados . . . . .	31
8.2. Dereverberación utilizando división en dominio de frecuencia . . . . .	32
8.2.1. Resultados . . . . .	36
8.3. Deconvolución utilizando herramienta de Matlab identificación de sistemas . .	37
8.3.1. Resultados . . . . .	40
<b>9. Deconvolución mediante filtro adaptativo LMS.</b>	<b>41</b>
9.1. Resultados con la implementación de filtro LMS y filtro FIR. . . . .	45
<b>10. Deconvolución mediante la implementación de filtro no lineal adaptativo LMS de Volterra.</b>	<b>47</b>
10.1. Resultados . . . . .	49
<b>11. Conclusiones</b>	<b>51</b>
<b>12. Recomendaciones</b>	<b>53</b>
<b>13. Bibliografía</b>	<b>55</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Sistema utilizado para elaboración de algoritmo robusto para estimación de fuente de señal acústica. [1] . . . . .	3
2.	Resultados para estimación de fuente se señal acústica utilizando algoritmo robusto. [1] . . . . .	4
3.	Filtro adaptativo lineal para cancelación de eco acústico.[2] . . . . .	5
4.	Ruta de eco acústico no lineal.[2] . . . . .	5
5.	Filtro no lineal para cancelación de eco acústico.[2] . . . . .	5
6.	Comparación de ERLE para diferentes tipo de filtrado.[2] . . . . .	6
7.	Esquema del sistema utilizado para la obtención de la respuesta al impulso.[6]	15
8.	Filtro FIR [9] . . . . .	16
9.	Filtro adaptativo general [9] . . . . .	16
10.	Filtro de Volterra de segundo orden.[10] . . . . .	18
11.	Diagrama de bloques del sistema. . . . .	21
12.	Vista de planta del sistema de la habitación. . . . .	22
13.	Vista 1 en 3d del sistema de la habitación. . . . .	22
14.	Vista 2 en 3d del sistema de la habitación. . . . .	23
15.	Gráfica de respuesta en frecuencia de micrófono MXL 550. . . . .	24
16.	Respuesta al impulso obtenida con sonido de tiempo corto y alta amplitud. . . . .	25
17.	Respuesta al impulso obtenida con un barrido exponencial de frecuencias. . . . .	26
18.	Respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado. . . . .	26
19.	Diagrama de bloques para función de Matlab "deconv". . . . .	27
20.	Error cuadrático medio para una señal de ruido blanco. . . . .	28
21.	Error cuadrático medio para una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz. . . . .	29
22.	Error cuadrático medio para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1500Hz. . . . .	30
23.	Diagrama de bloques para algoritmo deconvolutivo utilizando división en frecuencia. . . . .	32
24.	Error cuadrático medio para una señal de ruido blanco. . . . .	33
25.	Reconstrucción de señal de ruido blanco. . . . .	34
26.	Error cuadrático medio para una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz. . . . .	35
27.	Error cuadrático medio para una sinusoidal con frecuencia de 1500Hz. . . . .	36

28.	Diagrama de bloques para función de transferencia inversa. . . . .	38
29.	Error cuadrático medio para una señal sinusoidal a 1500Hz . . . . .	39
30.	Error cuadrático medio para una señal sinusoidal a 1500Hz . . . . .	39
31.	Diagrama de bloques filtro adaptativo LMS. . . . .	41
32.	Reconstrucción de una señal de ruido blanco utilizando filtro adaptativo LMS	42
33.	Reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz utilizando filtro adaptativo LMS . . . . .	43
34.	Reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz utilizando filtro FIR con coeficientes encontrados con filtro adaptativo LMS . . .	44
35.	Reconstrucción de una señal de ruido blanco utilizando filtro FIR con coeficientes encontrados con filtro adaptativo LMS . . . . .	45
36.	Reconstrucción de una señal de ruido blanco utilizando filtro adaptativo de segundo de Volterra LMS . . . . .	48
37.	Reconstrucción de una señal diente de sierra a 250Hz utilizando filtro adaptativo de segundo de Volterra LMS . . . . .	49

---

## Lista de cuadros

---

1.	Especificaciones de interfaz de audio utilizada. . . . .	24
2.	Especificaciones de micrófono utilizado. . . . .	24
3.	Resultados utilizando función Deconv . . . . .	31
4.	Resultados utilizando división en frecuencia. . . . .	37
5.	Resultados utilizando el método de identificación de sistemas . . . . .	40
6.	Resultados utilizando filtro adaptativo y sus coeficientes encontrados. . . . .	46
7.	Resultados filtro adaptativo LMS de Volterra . . . . .	50



Este proyecto tuvo como objetivo principal encontrar un método efectivo que logre eliminar de forma significativa las perturbaciones en una señal de audio causadas por la reverberación acústica de una habitación. Para lograr el objetivo fue necesario experimentar con distintos métodos deconvolutivos. Se utilizaron métodos que procesan la señal perturbada en tiempo y frecuencia. Tras probar distintos métodos deconvolutivos se pudo seleccionar el más eficiente sobre los métodos funcionales y también se puede descartar por completo todos los métodos que no funcionan para la aplicación.

El proyecto se dividió en la implementación de cinco métodos deconvolutivos principales. los métodos utilizados fueron: Deconvolución utilizando funciones existentes en Matlab, deconvolución utilizando división en dominio de frecuencia, deconvolución mediante filtros FIR con coeficientes constantes, deconvolución mediante identificación de sistemas y deconvolución mediante filtros adaptativos lineales y cuadráticos. Tras múltiples pruebas con todos los métodos se logro cumplir con el objetivo general, logrando encontrar un método efectivo para la eliminación de reverberación de audio para cuartos sin tratamiento acústico. Los métodos efectivos para lograr una deconvolución acústica mediante procesamiento de señales fueron los implementados con filtros adaptativos, ambos filtro LMS lineal y cuadrático fueron efectivos, los demás métodos se descartaron por no mostrar ninguna mejora en la reconstrucción de señales perturbadas por la reverberación característica de la habitación donde se realizaron las pruebas.

La métrica para determinar si en efecto las señales tuvieron mejora fue la de error cuadrático medio o conocido por sus siglas provenientes de nombre en inglés "mean squared error"(mse), donde entre mayor es el error más lejos se esta de lograr la reconstrucción de la señal. También se analizó a detalle la forma de la onda resultante, se compara con la señal deseada y con la señal perturbada, esto para tener una mejor comparación de resultados.



The main objective of this project was to find an effective method that significantly eliminates disturbances in audio signal cases by the acoustic reverberation of a room. To achieve the objective, it was necessary to experiment with different deconvolution methods. Methods that process the disturbed signal were used in time and frequency. After trying different deconvolution methods, it was possible to select the most efficient one.

This project was divided into the implementation of five main deconvolution methods. The methods were: deconvolution using specific functions in Matlab, deconvolution through division in the frequency domain, deconvolution through FIR filters with constant coefficients, deconvolution through system identification and deconvolution using linear and quadratic adaptive filters. After multiple tests with all of the methods, the main objective was achieved. An effective method for removing audio reverberation from rooms without acoustic treatment was found. The effective methods to achieving acoustic deconvolution through signal processing were those implemented with adaptive filters, both linear and quadratic LMS based filters were effective, the rest of the methods were discarded as showing no improvement in the reconstruction from the disturbed signals.

The metric to determine if the signals did improve was the mean squared error (mse). where the greater the error, the farther the signal reconstruction is from being enhanced. The resulting waveform was also analyzed in detail, compared with the desired signal and with the disturbed signal, this to have a better comparison of all the results.



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

En la industria de producción de audio se suele utilizar mucho el término "tratamiento acústico". El fin de realizar tratamiento acústico en cuarto es poder eliminar en su mayoría las reflexiones de ondas acústicas que ocurren en las paredes de la habitación.

La reverberación es un efecto muy utilizado en la modulación de audio para poder enriquecer el sonido de voces o instrumentos. Con los efectos reverberativos se pueden simular ambientes distintos como el de una catedral o el de un auditorium. En si la reverberación acústica termina siendo la respuesta de una habitación a una señal de audio.

Si bien la reverberación puede enriquecer el sonido, también lo puede perturbar, tal como sucede en los cuartos de grabación sin ningún tratamiento acústico. El propósito de este proyecto es poder eliminar esas perturbaciones no deseadas causadas por la reverberación y obtener una señal que sea la más parecida posible a la señal original.

Existen varios métodos convolutivos que funcionan de manera muy fiable. En este proyecto se buscará encontrar una función inversa a la de la respuesta al impulso de la habitación. Todo esto realizado únicamente con procesamiento de señales.



## 2.1. Convolución relevante para estimación de fuente acústica.

En la universidad de Filadelfia, Pensilvania se realizó un estudio para describir un algoritmo robusto para deconvolución. Esta investigación se basó en utilizar optimizaciones cuadráticas y con una señal de entrada conocida. En sí el trabajo se ve motivado en estimar de forma precisa la diferencia del retraso de las reflexiones causadas por la reverberación del ambiente. A partir de la respuesta al impulso.[1]

En Figura 1 se aprecia un diagrama que se utilizó para la preparación de la parte experimental de este estudio. donde  $s(t)$  es una señal acústica para ser captada por dos micrófonos en un ambiente con reverberación. Los micrófonos se encuentran en  $x_1$  y en  $x_2$ . Ambos micrófonos captaran las señales directamente atrasadas así como sus reflexiones y ruido del ambiente.

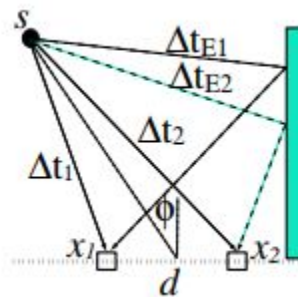


Figura 1: Sistema utilizado para elaboración de algoritmo robusto para estimación de fuente de señal acústica. [1]

Para la parte experimental de este estudio se tomó como fuente de señal acústica una grabación de voz a  $16kHz$  y 248 muestras. Se realizaron 2 filtros  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  con la función

de transferencia de dos puntos de observación distintos. Estos filtros fueron convolucionados con la fuente de señal acústica para generar la función de los observadores  $x_1(t)$  y  $x_2(t)$ . Ambas señales generadas  $x_1(t)$  y  $x_2(t)$  fueron perturbadas con ruido gaussiano. Utilizando la diferencia de retraso en las señales  $x_1(t)$  y  $x_2(t)$  se realizó un algoritmo deconvolutivo utilizando regularización bayesiana y una deconvolución no negativa para estimar la señal fuente. Conociendo ya la señal de fuente real  $s(t)$  y habiendo obtenido una aproximación mediante el algoritmo creado  $\hat{s}(t)$ .

Para La verificación de los resultados se compara gráficamente el error cuadrático medio  $\frac{\|\hat{s}(t)-s(t)\|^2}{\|s(t)\|^2}$ . En Figura 2 se observa el error del resultado de la estimación realizada, donde se comparan las señales  $x_1(t)$  y  $x_2(t)$  con diferentes niveles en la perturbación de ruido gaussiano.

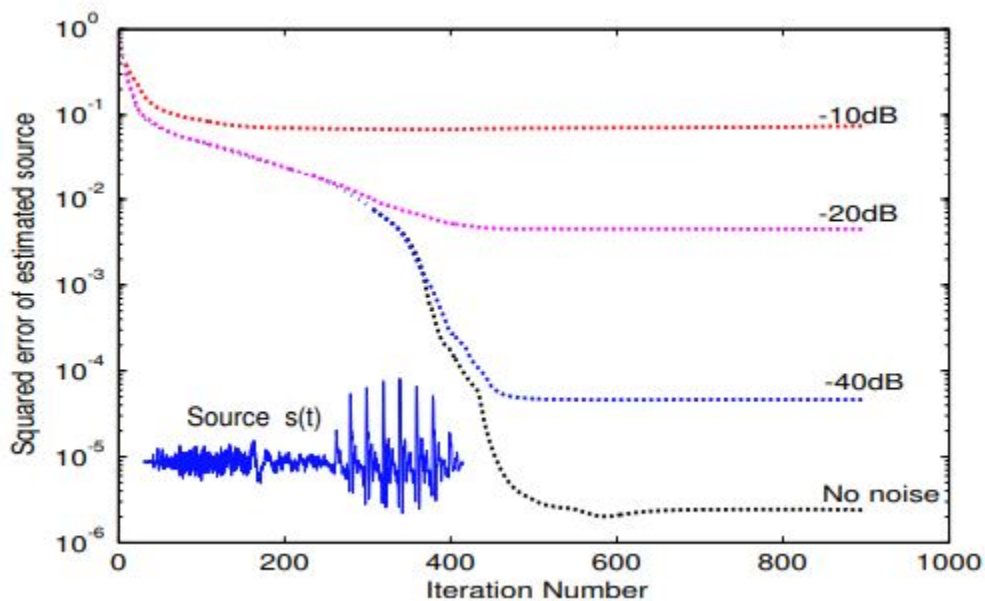


Figura 2: Resultados para estimación de fuente se señal acústica utilizando algoritmo robusto. [1]

## 2.2. Filtros adaptativos de Volterra para cancelación acústica no lineal.

En la universidad de Erlangen-Nürnberg se realizó una publicación donde mediante un filtro adaptativo de Volterra se reduce el eco acústico no lineal. Se ha demostrado que los filtros adaptativos de Volterra pueden ser utilizados en cancelación de eco para teléfonos. La necesidad de de muchos coeficientes no lo ha dejado ser un método viable para su uso práctico. El esquema típico para cancelación de eco acústico se muestra en 3. La señal de micrófono  $y[k]$  contiene la señal lineal de eco  $d[k] = x[k] * h[k]$  y un componente adicional  $n[k]$ . En este caso el eco acústico puede ser cancelado por medio de un filtro adaptativo lineal  $h[k]$  y solo la señal local  $n[k]$  es transmitida. Si se considera el caso donde  $n[k]$  tiene componentes de eco acústico no lineal.[2]

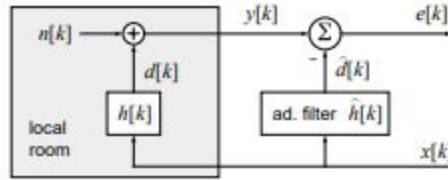


Figura 3: Filtro adaptativo lineal para cancelación de eco acústico.[2]

En Figura 4 se observa la ruta de eco acústico de forma seccionada. La principal fuente de no linealidades se encuentra en la parte (B) ya que las bocinas y amplificadores operan a su nivel más alto en la cadena de transmisión. Las no linealidades en secciones (A) que representa a los conversores analógico-digital y digital-analógico pueden ser despreciados para este contexto. El eco acústico en arte (C) se conoce como un sistema lineal y variante en el tiempo, pero el micrófono y el amplificador pueden ser modelados como un sistema LTI por sus señales con amplitud pequeña. Estos sistemas no logran un mejoramiento significativo.

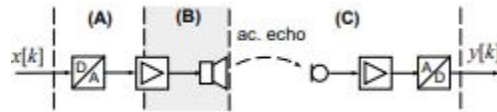


Figura 4: Ruta de eco acústico no lineal.[2]

En Figura 5 se muestra el esquema utilizado para un filtro de Volterra para la cancelación de eco acústico. Los resultados de este filtro fueron comparados con filtros previamente mostrados los cuales se basaban en filtros no lineales sin memorias y uno basado en filtros NLMS ("Normalized Least Mean Square") siendo una extensión de los filtros LMS. Los resultados se pueden observar en Figura 6. En la gráfica se compara la mejora en pérdida de eco. En (1) se muestra los resultados con un filtro NLMS, en (2) y (3) ambos muestras diferentes resultados para filtros basado en NLMS no lineales y sin memoria. (4) muestra la mejora que hay al utilizar filtros de Volterra.

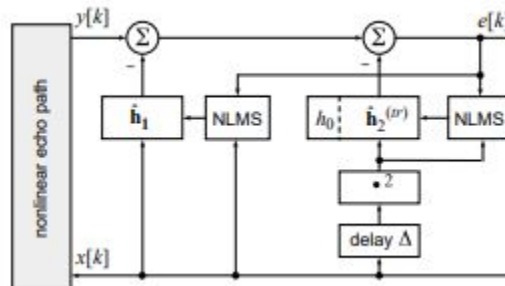


Figura 5: Filtro no lineal para cancelación de eco acústico.[2]

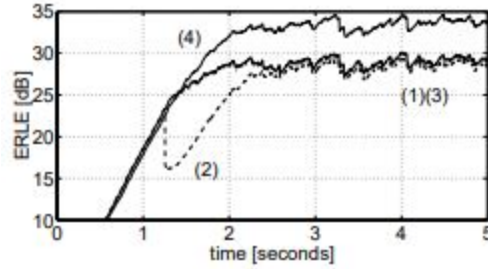


Figura 6: Comparación de ERLE para diferentes tipo de filtrado.[2]

### 2.3. Herramientas para encontrar respuesta al impulso de una habitación.

El software Matlab ha desarrollado una herramienta para determinar la respuesta al impulso de un cuarto. Esta herramienta permite encontrar la respuesta al impulso por dos métodos diferentes. Un método es utilizando un barrido de exponencial de frecuencias y el otro es por medio de una señal de ruido modulada. Luego de obtener la señal el algoritmo del programa realiza una deconvolución y se obtiene la respuesta al impulso del ambiente deseado. Con ambos métodos esta herramienta “Impulse Response Measurer” funciona bien. Otro software que tiene una herramienta similar es el programa de Logic Pro, con la diferencia que este solo utiliza el barrido exponencial de frecuencias.

En la actualidad el tratamiento acústico de una habitación es demasiado costoso en cuanto a recursos. En muchos casos una habitación nos se puede hacer un tratamiento acústico, ya sea por que es muy caro o por que la construcción no fue diseñada con motivos de grabación de audio. Este problema es representativo cuando una persona desea grabar audio en su propia habitación o estudio personal. Por lo tanto, un sistema de alta fidelidad que permite ecualizar las señales, generaría gran impacto en el tiempo de producción y calidad de audio.

Este proyecto puede ser de gran beneficio para músicos aficionados que quieren darse a conocer y también quieren mejorar la calidad de su producción. También puede dejar el camino abierto a futuros estudiantes que les interese el tema para crear sistemas sistemas similares y así poco a poco avanzar en las herramientas para músicos aficionados.

Existen trabajos que tratan sobre le mejoramiento en cuanto a calidad de audio. Aun así no existen muchas herramientas para editores de música basado en esos estudios. Es necesario crear herramientas funcionales basados en la teoría que ya existe.



### 4.1. Objetivo general

- Analizar y contrastar el resultado de distintos algoritmos deconvolutivos y distintas fuentes de audio, determinar y demostrar que existe un método que mediante procesamiento de señales sea capaz de anular de forma significativa las reflexiones de ondas sonoras en habitaciones con geometría irregular.

### 4.2. Objetivos específicos

- Implementar distintos algoritmos de procesamiento de señales, compararlos entre sí y validarlos con respecto a su efectividad y desempeño computacional. Se deberá determinar el desempeño y efectividad del algoritmo deconvolutivo.
- Medir la efectividad de un método deconvolutivo utilizando distintas señales de audio dentro de los algoritmos implementados.
- Evaluar y determinar cuáles son las señales de audio que muestran mayor efectividad con los algoritmos implementados.



Encontrar un método capaz de realizar un proceso devolutivo mediante procesamiento de señales para la eliminación de la reverberación acústica en una señal sobre un ambiente no tratado. se probará y contrastará entre distintos métodos de procesamiento de señales digitales. Los métodos deconvolutivos que no funcionen serán descartados mientras que los métodos que satisfagan los objetivos serán analizados para determinar cuál es más viable para su implementación.

Los métodos deconvolutivos que se seleccionen como métodos efectivos deberán de tener un error considerablemente pequeño en las señales de audio reconstruidas. Aparte de considerar el error de las señales también se deberá considerar la forma de la onda, es decir que la señal reconstruida debe parecerse visualmente a la señal deseada y, por lo tanto, la señal reconstruida debe tener una mejora significativa a comparación de la señal perturbada por la reverberación. Si algún método implementado no cumple con alguno de estos parámetros deberá ser clasificada como un método ineficiente y, por lo mismo, descartado.

Si se logra demostrar que es posible realizar una dereverberación a una señal perturbada con dos o más métodos son considerados como efectivos se deberán comparar su eficiencia entre ellos. Se comparará entre ellos su eficiencia y se seleccionará el mejor.

Se deberán implementar funciones de Matlab con procesos deconvolutivos y se modificarán para ser probados en dereverberación de audio. También se implementarán filtros adaptativos como método devolutivo, para estos se probarán 2 versiones del filtro LMS, un filtro lineal y el otro cuadrático. Únicamente se implementarán estas versiones de filtros adaptativos. Los algoritmos deconvolutivos serán únicamente implementados en Matlab y no en un VST.



## 6.1. Convolución

Convolución es una operación matemática entre dos funciones ( $f$  y  $g$ ) que produce una tercera función que expresa como la forma de una función es afectada por la otra. La convolución esta definida como la integral de un producto de dos funciones después de que una es reflejada y trasladada. La convolución de  $f$  y  $g$  es expresada como  $f * g$ . Es definida como se muestra en ecuación (1).[3]

$$(f * g) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad (1)$$

## 6.2. Reverberación

La reverberación es la persistencia en el sonido de las reflexiones de auditivas de un ambiente. Los factores que caracterizan a la reverberación son: el tiempo de reverberación y el color. El tiempo de reverberación se mide a partir de la primera reflexión que existe en un en el sistema. El color se define por la caracterización del sistema, es decir por las frecuencias que sean absorbidas y las frecuencias que sean reflejadas. Es posible realizar una reverberación digital emulando algún ambiente mediante procesamiento de señales. Para emular una reverberación basta con realizar la convolución entre la respuesta al impulso del sistema y la señal a la que se le quiera aplicar la reverberación. [4]

### 6.2.1. Aproximación de un filtro digital de reverberación

La respuesta al impulso de un cuarto con reverberación tiene duración larga, por lo tanto la señal digital tendrá varios términos. Para obtener el efecto de reverberación es necesario obtener la respuesta al impulso del ambiente que se quiera simular. En ecuación (2) se

muestran la convolución por índices donde  $h$  es la respuesta al impulso,  $x$  es la una fuente de audio y  $y(n)$  es el resultado de la reverberación.[5]

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (2)$$

El método para obtener una reverberación mediante convolución empieza por una medición. Las características sonoras de un espacio u objeto pueden ser capturados mediante la activación de sus propiedades acústicas con un impulso". Por lo general se utilizan sonidos relativamente atonales seleccionadas para activar todo el espectro audible. Los sonidos comúnmente utilizados son pistolas de fulminantes, aplauso, ruido blanco, onda sinusoidal con un barrido de frecuencias. Esta medición es obtenida por micrófonos que graban el audio resultante, con este se obtienen ambos, la respuesta original y la respuesta de reverberación del espacio. Por último esta respuesta grabada pasa por el proceso realizado en ecuación (2).

### 6.3. Respuesta al impulso mediante barrido de frecuencias sinusoidales

Es posible la obtención de la respuesta al impulso de una habitación utilizando un barrido de señales sinusoidales. Utilizando un sistema parecido al que se encuentra en Figura 7 debería ser posible obtener la respuesta al impulso de una habitación. La definición matemática para la señal de prueba se define cómo la expresión en ecuación (3). Para poder obtener la respuesta al impulso es necesario obtener la señal  $x(t)$  desde un observador, es decir desde un micrófono que este adentro de una habitación. Para obtener la respuesta al impulso debemos utilizar ecuación (4) donde  $h(t)$  sería la respuesta al impulso encontrada,  $y(t)$  la señal que el observador obtuvo y  $f(t)$  un filtro con la respuesta inversa al impulso de la habitación.

$$x(t) = \sin \frac{w_1 T}{\ln \frac{w_2}{w_1}} \left( e^{\frac{t}{T} \ln \frac{w_2}{w_1}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$h(t) = y(t) \otimes f(t) \quad (4)$$

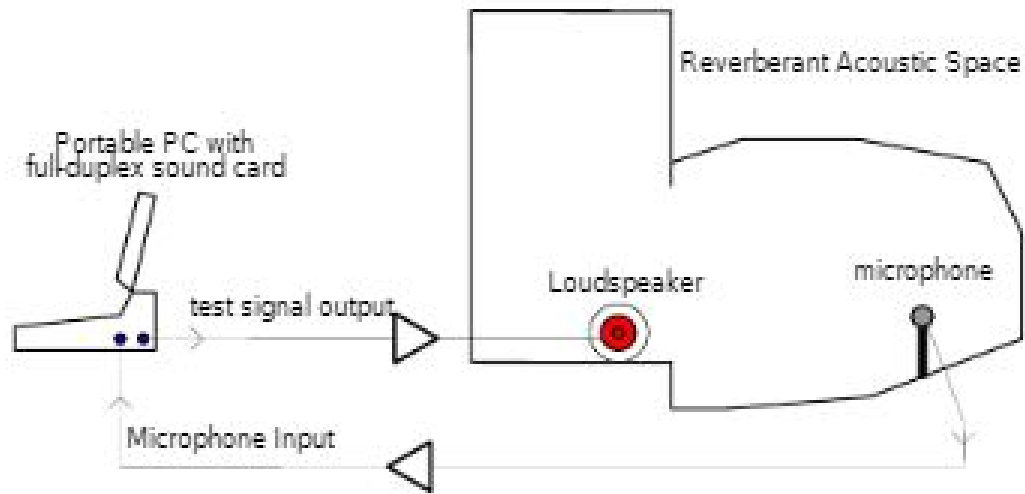


Figura 7: Esquema del sistema utilizado para la obtención de la respuesta al impulso.[6]

#### 6.4. Deconvolución ciega

Existen métodos para realizar una deconvolución ciega, es decir realizar una deconvolución sin saber cuál es la respuesta al impulso de un sistema. Los algoritmos que realizan este tipo de deconvolución se asumen valores en la entrada del sistema y en su respuesta al impulso. Estos algoritmos son utilizados para la reconstrucción de imágenes y señales.[7]

#### 6.5. Identificación de sistemas

La identificación de sistemas abarca muchas áreas en ingeniería. Con ella se busca encontrar una aproximación a un modelo matemático de algún sistema estático o dinámico. Los métodos de que se utilizan en identificación de sistemas se basan en filtrados y modelos fundamentales. Para obtener algún sistema se utilizan aproximaciones numéricas basados en métodos estadísticos a partir de los valores en la entrada y valores en las salidas. Existen herramientas digitales por lo cual es una herramienta muy útil en la industria de la ingeniería.[8]

#### 6.6. Filtros adaptativos

Un filtro adaptativo es un filtro que como el nombre lo dice se adapta a la necesidad mediante un algoritmo optimizado para encontrar los coeficientes. El filtro adaptativo LMS se basa en la configuración de un filtro adaptativo FIR. En Figura 8 se ve cómo es la configuración de un filtro FIR, donde en ecuación (5) es la entrada. Así mismo en ecuación (6) es el vector de pesos del filtro y en ecuación (7) es el vector de salida del filtro FIR. En

el vector de salida del filtro se puede notar que para cada elemento del vector de entrada  $x[n]$  pertenece un elemento del vector de pesos  $w[n]$

$$x[n] = [x[n], x[n - 1], \dots, x[n - N + 1]]^T \quad (5)$$

$$w[n] = [w_0[n], w_1[n], \dots, w_{N-1}[n]]^T \quad (6)$$

$$y[n] = \vec{w}^T[n] \vec{x}[n] = \vec{x}^T[n] \vec{w}[n] \quad (7)$$

d

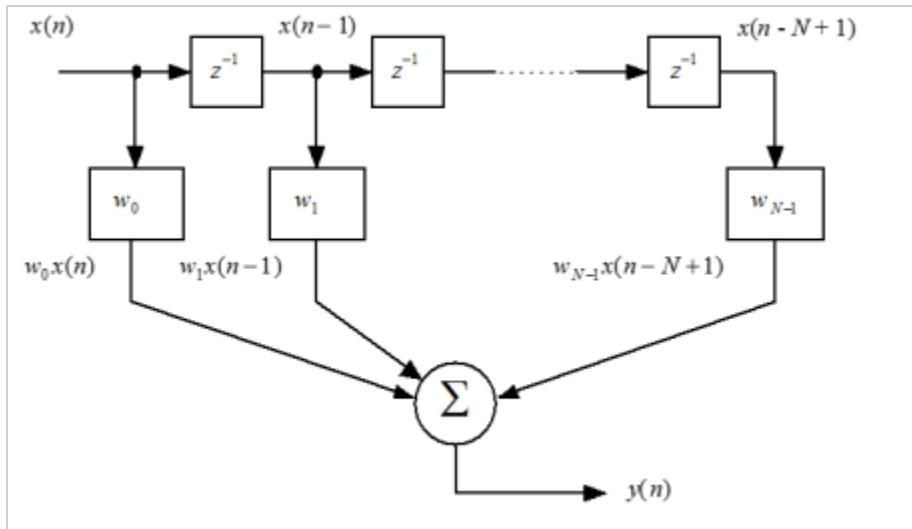


Figura 8: Filtro FIR [9]

En la Figura 9 se observa el diagrama de bloques general que tienen los filtros adaptativos FIR una señal discreta  $x(n)$  entra a ser filtrada la salida del filtro  $y(n)$  es comparada con la señal que se desea o la señal real  $d(n)$ , el error de ambas señales entra al filtro. El filtro tiene un algoritmo adaptativo que se encarga de obtener las constantes óptimas.[9].

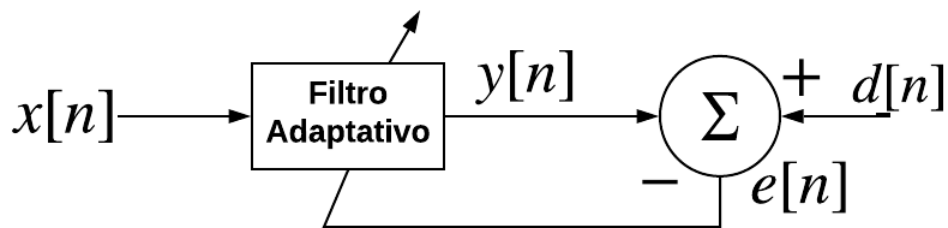


Figura 9: Filtro adaptativo general [9]

### 6.6.1. Filtro adaptativo LMS

El filtro LMS (mínimo cuadrático medio) es un filtro que en su algoritmo adaptativo utiliza el error cuadrado con el fin de ajustar sus constantes para que el error disminuya.

Este filtro tiene la ventaja sus coeficientes pertenecen a un filtro FIR, lo que nos asegura que el algoritmo implementado solo estará usando valores presentes y pasados. Para este filtro se necesita definir una función de costo  $\xi[n]$  para la obtención de un gradiente que permita al algoritmo adaptativo obtener los coeficientes para obtener la señal deseada.

El filtro adaptativo LMS utiliza como error instantáneo  $e_k^2$  para estimar el gradiente de la función de costo, es decir  $\xi[n] = E[e_k^2]$  tal como se ve en ecuación (8). [9]

$$\begin{aligned}
 e_k^2 &= d_k^2 + \vec{w}^T \vec{x}_k \vec{x}_k^T \vec{w} - 2d_k \vec{x}_k^T \vec{w} \\
 \frac{\partial e_k^2}{\partial \vec{w}} &= 2\vec{x}_k \vec{x}_k^T \vec{w} - 2d_k \vec{x}_k \\
 &= 2(\vec{x}_k^T \vec{w} - d_k) \vec{x}_k \\
 &= -2e_k \vec{x}_k
 \end{aligned} \tag{8}$$

Sabiendo cual es el gradiente a usar queda realizar el cálculo de los coeficiente. Ya que estos coeficientes deberán ir cambiando constantemente se necesita hacer uso del gradiente y de un escalar  $\beta$  que ajusta los pasos para la convergencia del filtro, como se muestra en ecuación (9).

$$\begin{aligned}
 \vec{w}_{k+1} &= \vec{w}_k - \beta \vec{\nabla}_k \\
 &= \vec{w}_k + 2e_k \vec{x}_k
 \end{aligned} \tag{9}$$

### 6.6.2. Filtro adaptativo de Volterra de segundo orden LMS

Los filtros de Volterra están basados en las series de Volterra, el cual puede ser descrito como una serie de Taylor con memoria. El filtro de Volterra de segundo orden consiste en una compensación escalar, una parte lineal y una parte cuadrática tal como se puede observar en Figura 10.

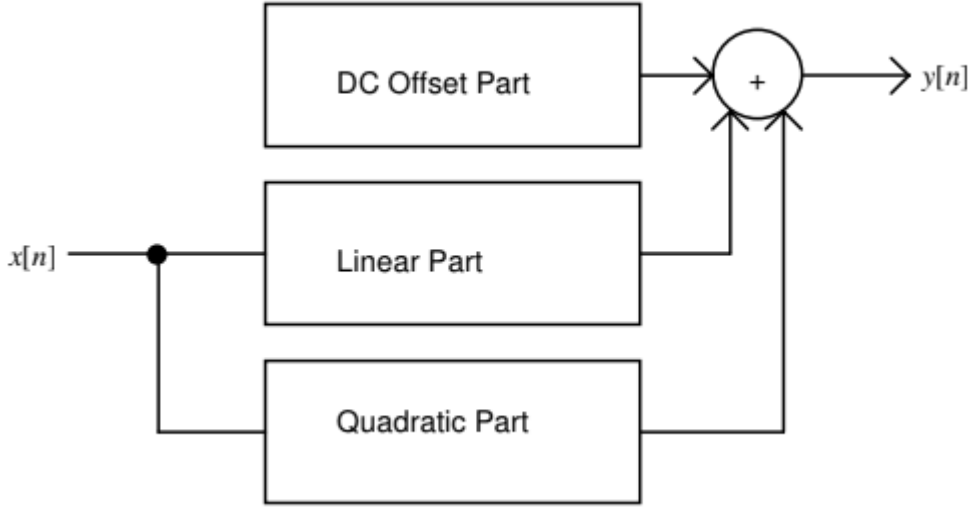


Figura 10: Filtro de Volterra de segundo orden.[10]

En ecuación (10) se observa la el modelo de salida de un filtro de Volterra de segundo orden donde  $h_0$  es la constante escalar para hacer a  $y[n]$  un estimador imparcial y actúa como el compensador escalar. Mientras  $\mathbf{a}[n]$  y  $\mathbf{B}[n]$  Son el kernel lineal y cuadrático.

$$y[n] = h_0 + \mathbf{a}^T[n]x[n] + x^T[n]\mathbf{B}[n]x[n] \quad (10)$$

Los principios para un filtro adaptativo de Volterra de segundo orden LMS parten del mismo concepto que el filtro adaptativo FIR LMS. Para un filtro de volteara de segundo orden se tienen un vector de pesos  $a[n]$  para la componente lineal y una matriz de pesos  $B[n]$  para la componente cuadrática.

$$x[n] = \begin{bmatrix} x[n] \\ x[n-1] \\ \vdots \\ x[n-p+1] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a[n] = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1[0;n] \\ h_1[1;n] \\ \vdots \\ h_1[p-1;n] \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B[n] = \begin{bmatrix} b_{00} & b_{01} & \dots & b_{0,p-1} \\ b_{10} & b_{11} & \dots & b_{1,p-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{p-1,0} & b_{p-1,1} & \dots & b_{p-1,p-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B[n] = \begin{bmatrix} h_2[0,0;n] & h_2[0,1;n] & \dots & h_2[0,p-1;n] \\ h_2[1,0;n] & h_2[1,1;n] & \dots & h_2[1,p-1;n] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_2[p-1,0;n] & h_2[p-1,1;n] & \dots & h_2[p-1,p-1;n] \end{bmatrix}$$

Al igual que para el filtro adaptativo FIR LMS se necesita un gradiente para los pesos, con la diferencia que para el filtro adaptativo de Volterra de segundo orden se necesita un gradiente para la componente lineal, para la cuadrática y para el compensador escalar, es decir que se necesitan tres gradientes  $\nabla_{h_0}$ ,  $\nabla_a$  y  $\nabla_B$ .

$$\nabla_{h_0} = -2E\{e[n]\} \quad (14)$$

$$\nabla_a = -2E\{e[n]x[n]\} \quad (15)$$

$$\nabla_B = -2E\{e[n]x[n]x^T[n]\} \quad (16)$$

Con los gradientes conocidos es posible obtener las ecuaciones para el calculo de los pesos de las componentes cuadráticas y lineales. La ecuación (10) puede ser sustituida con las ecuaciones obtenidas y pasar de tener un filtro de segundo orden de Volterra a un filtro de segundo orden de Volterra LMS. Las constantes  $\mu_0$ ,  $\mu_a$  y  $\mu_B$  son valores positivos pequeños para controlar la velocidad de convergencia del filtro

$$h_0[n+1] = h_0[n] + \mu_0 e[n] \quad (17)$$

$$B[n+1] = B[n] + \mu_B e[n]x[n]x^T[n] \quad (18)$$

$$a[n+1] = a[n] + \mu_a e[n]x[n] \quad (19)$$

$$e[n] = d[n] - h_0[n] - a^T[n]x[n] - x^T[n]B[n]x[n] \quad (20)$$



---

## Obtención de señales de audio

---

Para poder determinar un método deconvolutivo que logre eliminar de forma significativa la reverberación acústica de una habitación es necesario obtener dos señales diferentes. Una señal corresponde a una referencia, esta señal se denomina como la señal deseada. Otra corresponde a la señal perturbada por la reverberación acústica de la habitación, esta señal se comparara con la señal deseada para determinar su error.

Para la obtención de la señal deseada se utilizó un reproductor de audio conectada a una interfaz digital de audio. La señal deseada fue reproducida en y grabada en en una computadora mediante la interfaz de audio, tal como se muestra en el diagrama de bloques en Figura 11 . Al mismo tiempo que se obtuvo la señal deseada se obtuvo la señal perturbada por la reverberación acústica. La señal entrante a la interfaz se conecto a una bocina y esta misma se grabó con un micrófono de condensador, esto se realizó con el fin de poder tener una correlación entre ambas señales. El sistema utilizado fue similar al sistema del esquema en Figura 7. El sistema del cuarto puede ser observado en Figuras 12, 13 y 14.

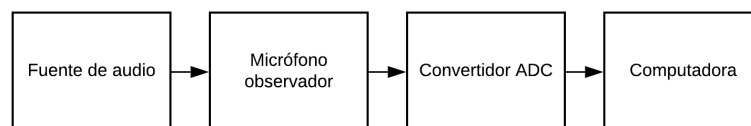


Figura 11: Diagrama de bloques del sistema.

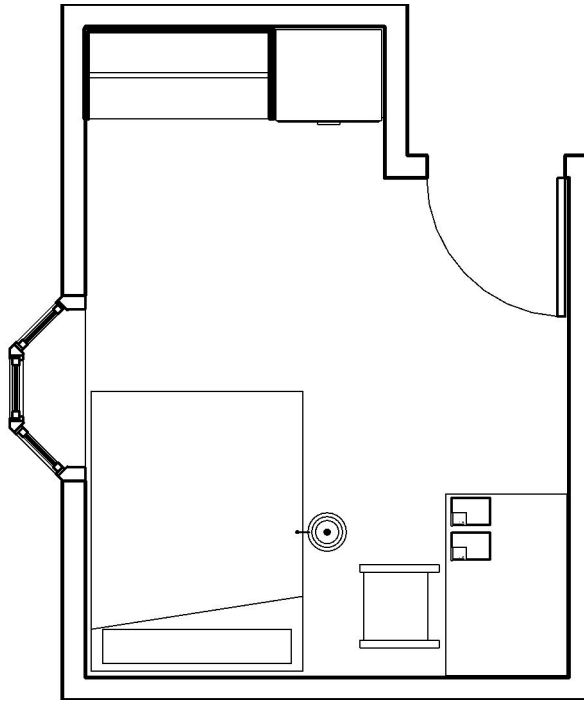


Figura 12: Vista de planta del sistema de la habitación.



Figura 13: Vista 1 en 3d del sistema de la habitación.



Figura 14: Vista 2 en 3d del sistema de la habitación.

Una vez obtenidas las señales se continuó a la prueba de distintos métodos deconvolutivos. Para probar distintos métodos deconvolutivos se implantaron diferentes algoritmos utilizando Matlab y alguna de sus librerías ya incluidas. El resultado de cada prueba se denominó como la señal reconstruida. La señal reconstruida se comparó con la señal deseada para determinar si el método deconvolutivo seleccionado elimina de forma significativa la reverberación de una habitación.

## 7.1. Equipo utilizado para obtención de señales

El equipo de audio utilizado para la obtención de las señales de audio fue una interfaz de audio Beringer U-Phoria UMC202HD de dos canales, un micrófono de condensador MXL 550 y una bocinas SONY ZS-RS70BT. Las especificaciones de estos equipos pueden observarse en Cuadros 1 y 2. El rango de frecuencias del micrófono MXK 550 se puede observar en Figura 15.

En efecto, las características del micrófono y de la interfaz de audio deberían ser suficientemente buenas para poder obtener las señales provenientes de la fuente de audio con buena resolución. Cabe mencionar que por la alta sensibilidad del micrófono de condensador se pueden filtrar señales de audio externas a las que se desee obtener.

Interfaz Beringer UMC202HD	
Canales	2
Respuesta a frecuencia	10Hz-50KHz(0/-3 db)
Impedancia	Mic in: 3k Ohm Instrument in: 1M Ohm
Nivel maximo de entrada	Mic: -4dBu Line: +20dBu Instrument: -3dBu
Capacidad de muestreo	44.1/48/88.2/96/176.4/192KHz

Cuadro 1: Especificaciones de interfaz de audio utilizada.

Micrófono MXL 550	
Tipo	De condensador
Tamaño de capsula	22mm
Patron polar	cardionde
Sensibilidad	15mV/Pa
Impedancia de salida	200 Ohms
Ruido equivalente	20 dB
Radio S/N	80 dB
Max SPL	130 dB

Cuadro 2: Especificaciones de micrófono utilizado.

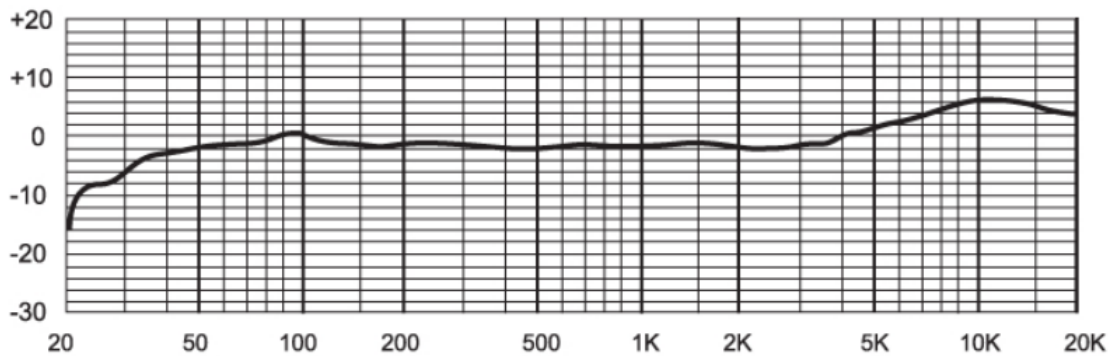


Figura 15: Gráfica de respuesta en frecuencia de micrófono MXL 550.

## 7.2. obtención de respuesta al impulso de la habitación

### Obtención con un sonido corto de tiempo tendiente a cero.

En algunos métodos se necesitó la obtención de una tercera señal, esta señal fue la respuesta al impulso de la habitación. La respuesta al impulso se obtuvo de 3 formas diferentes. La forma más sencilla de obtener la respuesta al impulso de una habitación fue mediante un sonido de alta amplitud, corto en tiempo tendiente a cero. Con un micrófono de condensador y una interfaz de audio conectada a una computadora. El proceso de este método consistió en dentro de la habitación del sistema, para generar un sonido de alta amplitud y muy corto en tiempo, esta respuesta fue grabada por un micrófono de condensador.

La señal grabada en el micrófono de condensador permite modelar la respuesta al impulso de una habitación. Si esta señal se utiliza para hacer la operación de convolución con otra señal de audio limpia, es decir sin ninguna perturbación de reverberación, esta dará la percepción que el audio fue grabado en la habitación de donde se extrajo la respuesta al impulso.

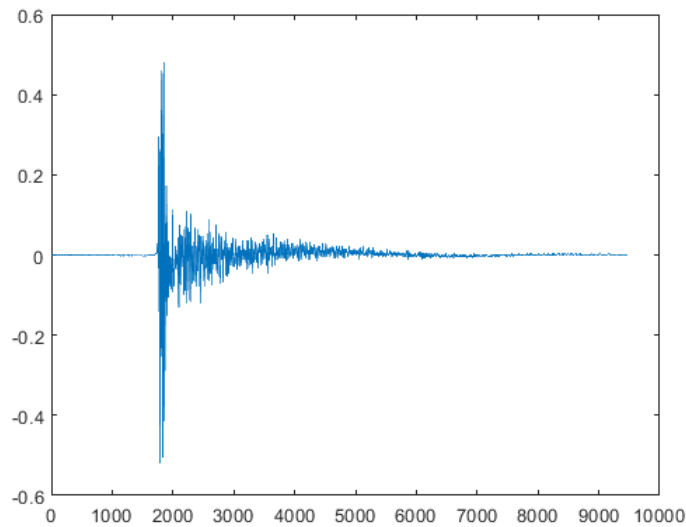


Figura 16: Respuesta al impulso obtenida con sonido de tiempo corto y alta amplitud.

### Utilizando herramientas de matlab

Otra forma para la obtención de la respuesta al impulso fue utilizando la herramienta de Matlab “impulse response measure”. Esta herramienta permite la obtención de la respuesta al impulso de dos formas distintas, una es mediante un barrido exponencial de frecuencias en una señal sinusoidal y la otra es mediante una señal de ruido modulado. El procedimiento consiste en seleccionar uno de los métodos, luego en unas bocinas conectadas a una interfaz de audio reproducir la señal seleccionada, ya sea una señal sinusoidal con barrido de frecuencia exponencial o una señal de ruido modulado, y esta señal será grabada en un micrófono

conectada a la misma interfaz de audio. Luego de obtener grabar las señales la misma herramienta de Matlab procede a hacer un proceso deconvolutivo para obtener la respuesta al impulso de la habitación.

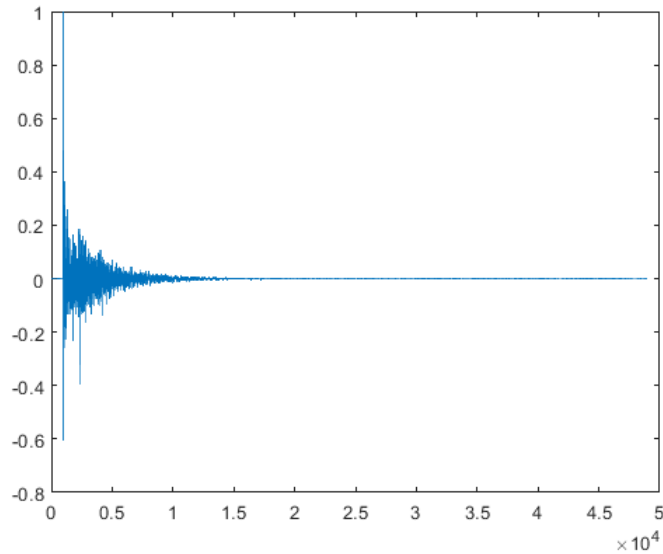


Figura 17: Respuesta al impulso obtenida con un barrido exponencial de frecuencias.

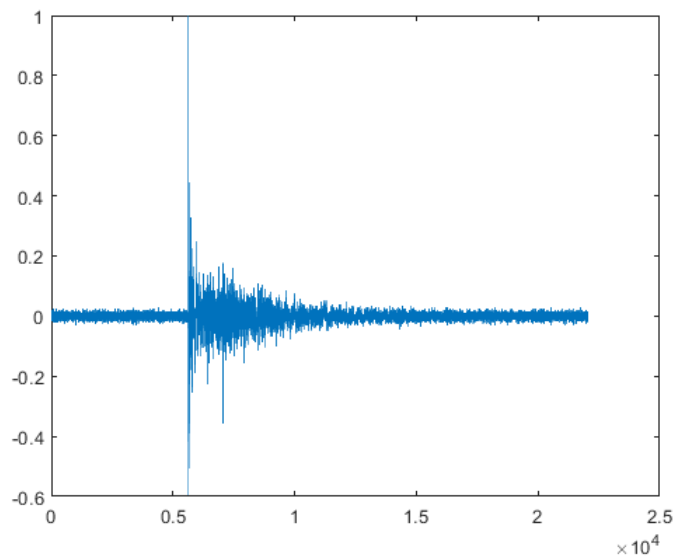


Figura 18: Respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.

Comparando por observación las gráficas en Figuras 16, 17 y 18, cada una de las respuestas al impulso resulto ser diferente. Dado que las tres respuestas son diferentes entre ellas lo indicado seria implementar los tres casos con los algoritmos que necesiten la respuesta al impulso de la habitación.

---

## Deconvolución mediante procesamiento de señales con distintos métodos

---

### 8.1. Dereverberación utilizando función "deconv" de Matlab

El software de Matlab cuenta con una función llamada "deconv". Esta función recibe dos parámetros y devuelve el resultado de deconvolutivo. Es decir, si se tiene una señal discreta  $y[n]$  que es el resultado de la operación  $h[n] * x[n]$ , siendo  $h[n]$  y  $y[n]$  señales conocidas. Se podría ingresar como parámetros para la función "deconv"  $h[n]$  y  $y[n]$ , y esta tendría que retornar la señal  $x[n]$  tal como se muestra en el diagrama de bloques de Figura 19.

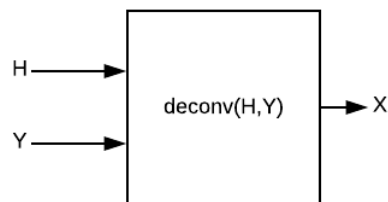


Figura 19: Diagrama de bloques para función de Matlab "deconv".

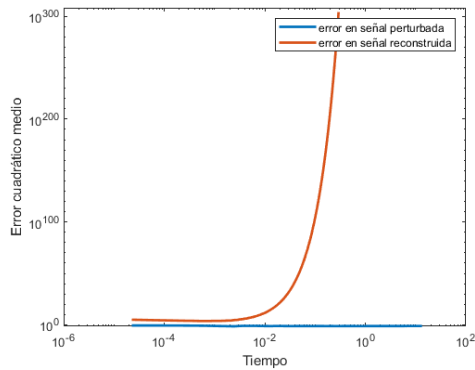
Se decidió usar este método por su baja complejidad de ejecución y si este método llegase a ser efectivo tomar estos resultados como punto de partida para un algoritmo eficaz de eliminar la reverberación acústica en audio.

Para la prueba de esta función en señales acústicas es necesario ingresar como parámetros la respuesta al impulso obtenida de una habitación mediante distintos métodos ( $h[n]$ ), y una señal que se le quieran quitar las perturbaciones causadas por la reverberación ( $y[n]$ ). Para

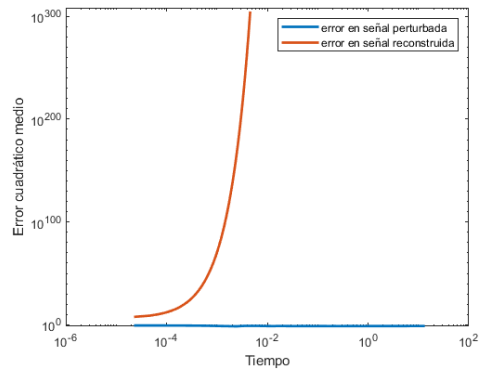
determinar si el método funciona o no se debe comparar con la señal deseada ( $x[n]$ ). Se realizo la prueba con distintas señales de entrada y para cada señal de entrada se utilizaron las tres distintas respuestas al impulso de la habitación.

Para este método se hizo uso de las 3 distintas formas de obtener la respuesta al impulso. Para las pruebas se utilizaron distintos tipos de señal se utilizaron ondas diente de sierra, ondas sinusoidales y señal de ruido blanco. Cada una de las pruebas se realizo con las 3 respuestas al impulso.

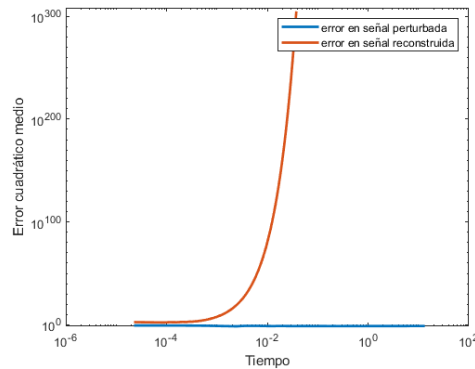
Se empezó por probar una señal equipotencial en su espectro de frecuencias con proceso estocástico, es decir se realizo la prueba con una señal de ruido blanco (WN). Esta señal cuenta con un sin fin de discontinuidades. Si la función "Deconv" de Matlab funcionase sobre esta señal nos daría como resultado un filtro anti reverberación. Lastimosamente no se pudo tener éxito en esta prueba, ya que el error Cuadrático medio de la señal reconstruida tiene a infinito de forma muy rápida, tal como se aprecia en figuras 20a,20b y 20c.



(a) MSE respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



(b) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.



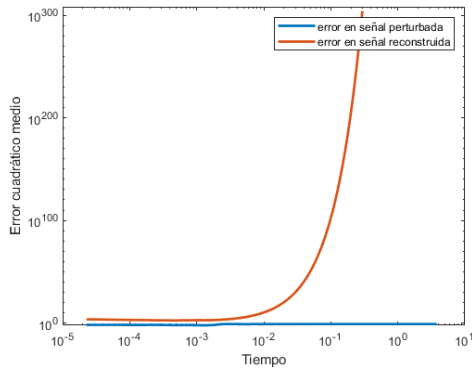
(c) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

Figura 20: Error cuadrático medio para una señal de ruido blanco.

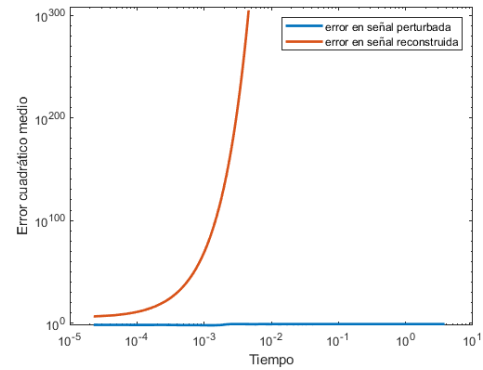
Debido a que la prueba no funcionó con la señal de ruido blanco se probó con una señal estática y sin tan tantas discontinuidades como las del ruido blanco. La señal que se utilizó fue una señal de diente de sierra. Para esta prueba se utilizaron varias señales diente de sierra

a distintas frecuencias. También se utilizaron las distintas formas de obtener la respuesta al impulso de la habitación.

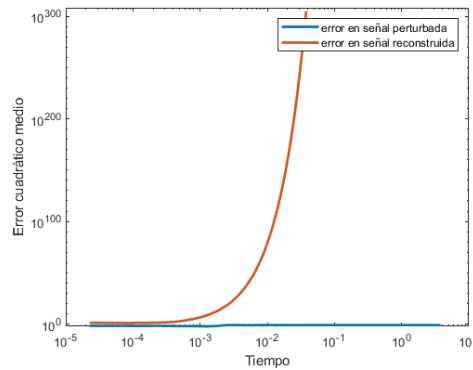
Si este método funciona con la señal diente de sierra podría ser aun un buen punto de partida para un algoritmo eficaz para la eliminación de reverberación acústica. Lastimosamente con estas señales tampoco se pudo tener un resultado exitoso. En las figuras 21a, 21b y 21c se puede ver que en las pruebas realizadas para para una señal diente de sierra a una frecuencia de 250Hz fue igual de desalentadora que la prueba realizada con la señal de ruido blanco. En esta prueba realizada también se ve como el error de la señal tiende a infinita de forma rápida.



(a) MSE respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



(b) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.

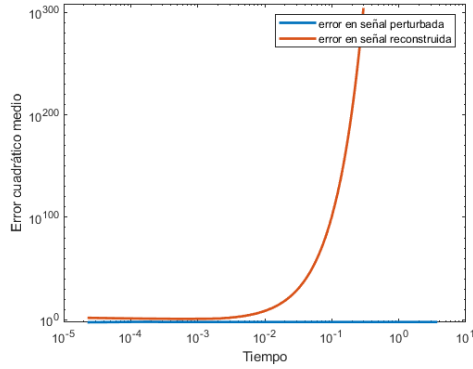


(c) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

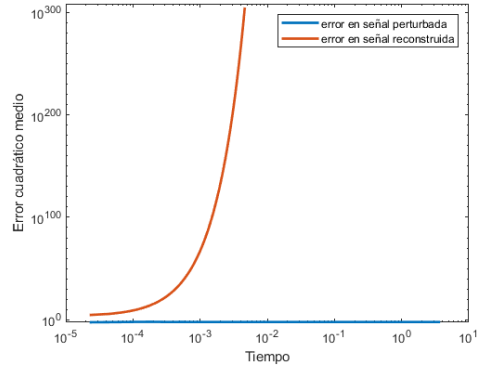
Figura 21: Error cuadrático medio para una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.

Dado que las pruebas realizadas con una señal diente sierra y con una señal de ruido blanco demostraron todo lo contrario a eficaz, se probó con una señal estática y continua. Para esta prueba se utilizaron distintas señales sinusoidales a diferente frecuencia. Al igual que en pruebas anteriores estas se realizaron para las tres distintas respuestas al impulso obtenidas. Se decidió probar con señales sinusoidales debido a que pueda que las pruebas anteriores hayan fallado debido a las discontinuidades que presentan.

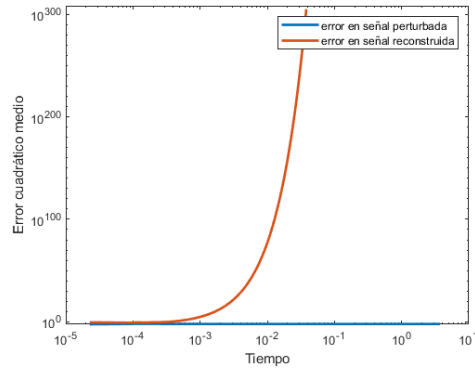
Las gráficas en Figuras 22a, 22b y 22c muestran que este método no es eficaz para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1500Hz. A pesar que esta es una señal continua el error al utilizar este método sigue creciendo a un valor muy grande de forma extremadamente rápida.



(a) MSE respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



(b) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.



(c) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

Figura 22: Error cuadrático medio para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1500Hz.

### 8.1.1. Resultados

Función	MSE señal reconstruida.
WN	inf
st 250Hz	inf
st 500Hz	inf
st 1000Hz	inf
st 1500Hz	inf
st 2000Hz	inf
st 3000Hz	inf
st 6000Hz	inf
st 20000Hz	inf
sine 250Hz	inf
sine 500Hz	inf
sine 1000Hz	inf
sine 1500Hz	inf
sine 2000Hz	inf
sine 3000Hz	inf
sine 6000Hz	inf

Cuadro 3: Resultados utilizando función Deconv

Para los resultados de este y de los siguientes capítulos se abrevió **WN** como una señal de ruido modulado, **st** como una señal diente de sierra y **sine** como una señal sinusoidal. Los valores numéricos seguidos de cada abreviación representa el valor de la frecuencia de la señal de audio de entrada del sistema.

Observando Cuadro 3 se puede apreciar que este método no funcionó para ninguna de las señales de entrada que se utilizó. El error cuadrático medio de la señal reconstruida respecto a la señal deseada tendió a infinito para cada uno de los casos. La información en la columna de “Error mse en señal reconstruida” aplica para los 3 distintos métodos de respuesta al impulso. Analizando esta tabla y las Figuras 20,21 y 22 descritas con anterioridad, este método deberá ser descartado. Este método no logró cumplir con lo deseado, es decir no logró eliminar la reverberación a una señal de audio.

No tiene sentido seguir realizando pruebas con este método deconvolutivo y tampoco tomarlo como punto de partida ya que este método agrega muchísimo más error comparada con una señal de audio limpia que el error que se produce con una señal perturbada por la reverberación de la habitación.

## 8.2. Dereverberación utilizando división en dominio de frecuencia

La operación de convolución de dos señales en el dominio del tiempo se puede reescribir como la multiplicación de 2 señales en el dominio de frecuencia. es decir que la operación discreta  $y[n] = h[n] * x[n]$  puede ser reescrita en el dominio de frecuencia como  $Y[Z] = H[Z]X[Z]$ . sabiendo esto y utilizando el Matlab se realizó un algoritmo con el fin de realizar una operación devolutiva entre dos señales. Con el fin de eliminar las perturbaciones causadas por la reverberación de una habitación al algoritmo realizado debe recibir como entradas dos señales. Las tres señales que se deben de tener son:La señal con perturbaciones causadas por la reverberación de la habitación y la respuesta al impulso. El algoritmo se encarga de pasar las señales del dominio del tiempo al dominio de frecuencia, se realiza la división en el dominio de frecuencia y el resultado de la operación de devuelve al dominio del tiempo.

Si se cuenta con la señal perturbada por la reverberación acústica de la habitación ( $y[n]$ ) y la respuesta al impulso de la habitación ( $h[n]$ ), se podría encontrar la señal original sin perturbaciones ( $x[n]$ ). Para fines experimentales es necesario contar con la señal original o señal deseada.

Por lo tanto, el algoritmo implementado en este método funciona a partir de la operación  $y[n] = h[n] * x[n]$ , pasándola al dominio de frecuencia como  $Y[Z] = H[Z]X[Z]$ . Después de esto es posible encontrar  $X[Z]$  y, por lo tanto también, es posible encontrar  $x[n]$ . El proceso de este algoritmo se puede apreciar en el diagrama de bloques de Figura 23.

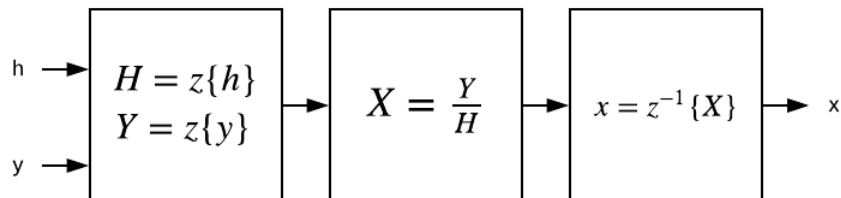
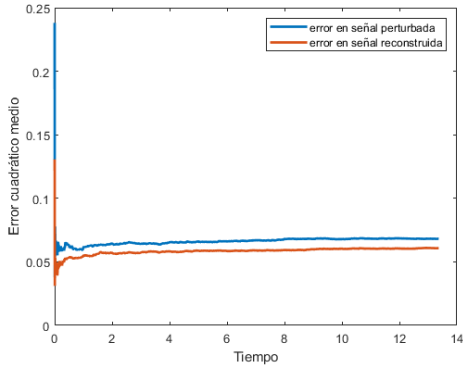
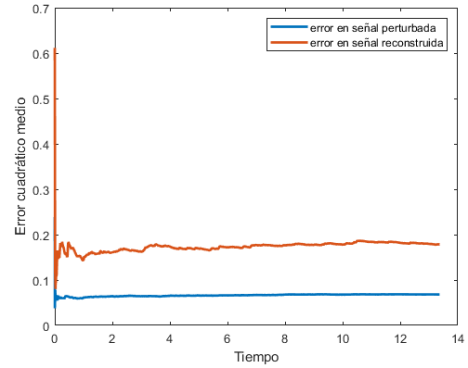


Figura 23: Diagrama de bloques para algoritmo deconvolutivo utilizando división en frecuencia.

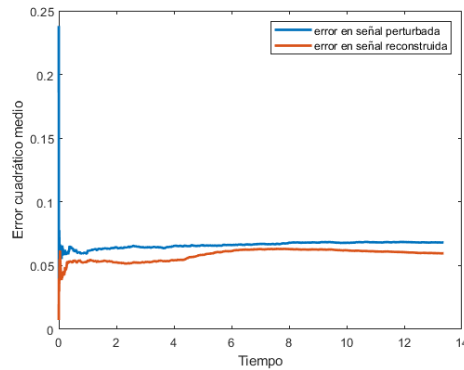
Para probar este método deconvolutivo se empezó por probar eliminar la reverberación acústica a una señal de ruido blanco. La prueba se realizó con las tres diferentes formas de respuesta al impulso de la habitación. En Figura 24 se puede ver el error cuadrático medio que se obtuvo con estas pruebas. Se puede observar en estas tres gráficas que en Figuras 24a y 24c se obtuvo una mejora en cuanto al error cuadrático medio de la señal reconstruida, a diferencia que en Figura 24b donde el error cuadrático medio de la señal reconstruida es mayor que el de la señal perturbada. Analizando la diferencia que existe entre estas tres gráficas se puede decir que, en efecto, la forma de encontrar la respuesta al impulso de la habitación influye en los resultados del algoritmo deconvolutivo.



(a) MSE respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



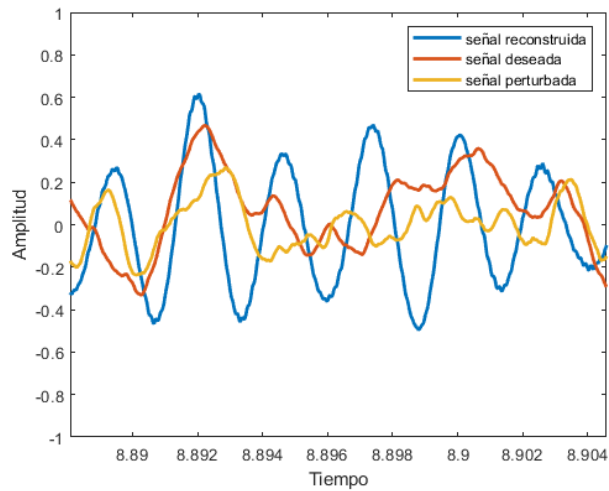
(b) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.



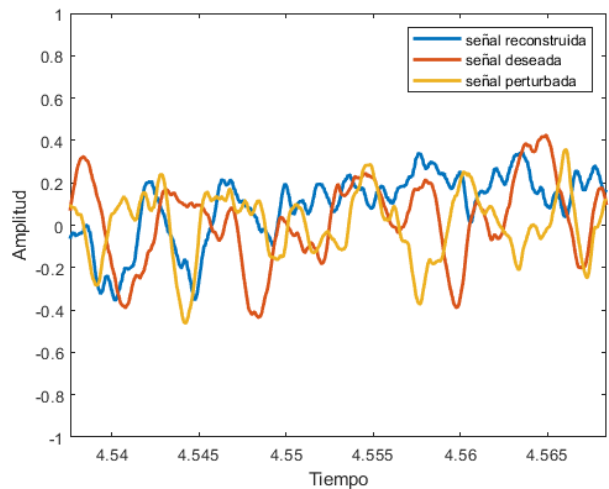
(c) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

Figura 24: Error cuadrático medio para una señal de ruido blanco.

Una vez obtenido una mejora en el error cuadrático medio de la señal reconstruido se procedió a comparar la forma de la onda. Para poder llamar a este método deconvolutivo como un método eficaz para la dereverberación acústica es necesario analizar la forma de la onda y que la señal reconstruida sea lo mas parecido a la señal deseada. En Figuras 25a y 25b se puede ver que a que a pesar que el error cuadrático medio de la señal reconstruida es menor al de la señal perturbada, la forma de la onda reconstruida no se parece en nada a la forma de la señal deseada. La forma de la onda de la señal perturbada se parece más al de la señal.



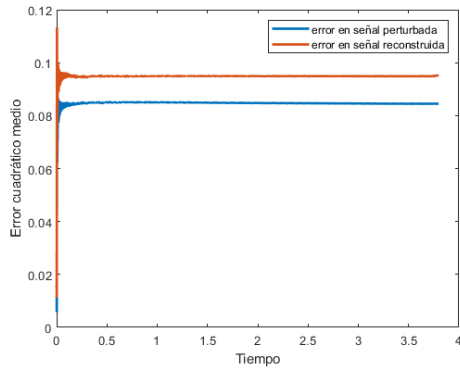
(a) Reconstrucción utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



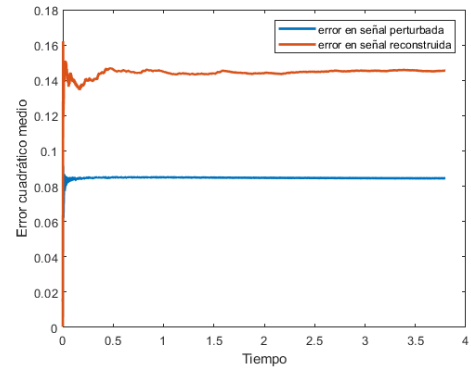
(b) Reconstrucción utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

Figura 25: Reconstrucción de señal de ruido blanco.

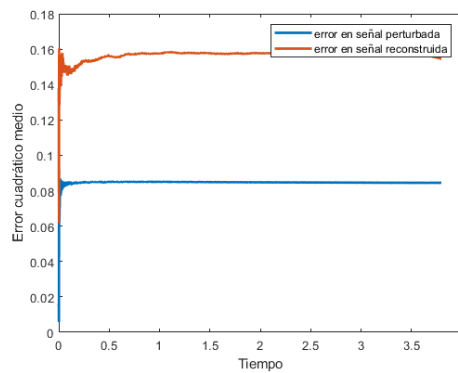
A pesar de no haber obtenido una reconstrucción de la señal de ruido blanco se pudo hacer que el error disminuyera para dos casos. Esto pudo haber sido por la aleatoriedad de la señal por ende todas las discontinuidades que tiene. Como siguiente paso se procedió a realizar las pruebas con una señal diente de sierra a distintas frecuencias. En Figuras 26a, 26b y 26c se puede ver que para una señal diente de sierra a una frecuencia de 250Hz este método presentó un error cuadrático medio mayor al de la señal perturbada. Esto puede ser la discontinuidades en la señal diente de sierra.



(a) MSE respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



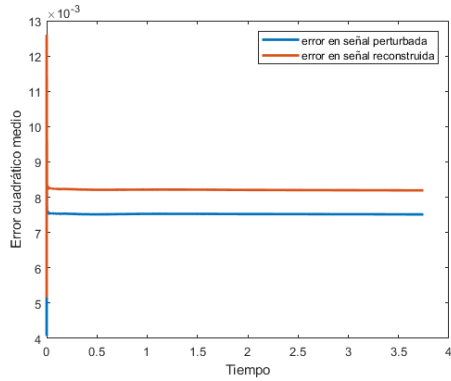
(b) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.



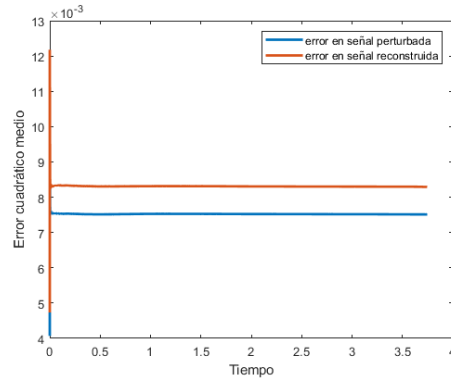
(c) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

Figura 26: Error cuadrático medio para una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.

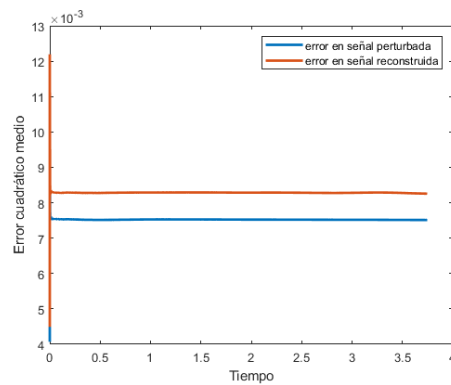
Se procedió a probar este método con una señal sin discontinuidades. Estas pruebas se realizaron con una señal sinusoidal a diferentes frecuencias. A pesar de que estas pruebas se realizaron con una señal continua en el tiempo el error de la señal reconstruida seguía siendo mayor al de la señal perturbada. En Figuras 27a, 27a y 27a se observa que en efecto el error cuadrático medio de la señal reconstruida por este método no es eficaz para eliminar la reverberación acústica.



(a) MSE respuesta al impulso obtenida con una señal corta de tiempo y alta amplitud.



(b) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una señal de ruido modulado.



(c) MSE utilizando respuesta al impulso obtenida con una barrido exponencial de frecuencias.

Figura 27: Error cuadrático medio para una sinusoidal con frecuencia de 1500Hz.

### 8.2.1. Resultados

En Cuadro 4 muestran los resultados obtenidos con todas las señales probadas a diferente frecuencia y con diferente método de obtención de respuesta al impulso. Claramente se observa que para todas las pruebas que se realizaron el error cuadrático medio es más grande que el error cuadrático medio de las señales reconstruidas.

A pesar que los resultados de error cuadrático medio que se obtuvieron con la deconvolución utilizando una señal de ruido blanco como señal de entrada al sistema parecía en un principio ser prometedora, no lo fue. Esto se debe a que al momento de revisar la forma de la onda esta no parecía tener mejora, más bien se miraba peor que la señal ya perturbada. Al momento de corroborar con las señales diente de sierra y señales sinusoidales se pudo determinar que en efecto este método deconvolutivo no fue capaz de cumplir con el objetivo, ya que la reconstrucción de todas estas señales mostró un error mayor al de la señal perturbada.

Función	MSE señal perturbada	MSE señales reconstruidas		
		Sonido corto de tiempo	Ruido modulado	Barrido exponencial de frecuencias
WN	0.0681	0.0558	0.195	0.0537
st 250	0.0845	0.0946	0.156	0.153
st 500	0.0753	0.189	0.169	0.258
st 1000	0.0938	0.389	0.236	0.245
st 1500	0.0756	0.214	0.189	0.268
st 2000	0.087	0.154	0.183	0.267
st 3000	0.0883	0.217	0.145	0.267
st 6000	0.0763	0.246	0.132	0.268
st 20000	0.0986	0.112	0.147	0.254
sine 250	0.0036	0.214	0.268	0.263
sine 500	0.0089	0.236	0.423	0.199
sine 1000	0.0063	0.145	0.139	0.232
sine 1500	0.0075	0.0084	0.0086	0.0084
sine 2000	0.0056	0.256	0.235	0.311
sine 3000	0.074	0.273	0.247	0.265
sine 6000	0.061	0.149	0.325	0.235

Cuadro 4: Resultados utilizando división en frecuencia.

### 8.3. Deconvolución utilizando herramienta de Matlab identificación de sistemas

Matlab cuenta con una herramienta llamada identificación de sistemas. Para que esta herramienta funcione es necesario conocer la entrada y salida del sistema. A partir de esto un algoritmo que utiliza aproximaciones numéricas brinda una función de transferencia aproximada del sistema con parámetros que uno decida.

Una opción que tiene la herramienta de identificación de señales de Matlab es que permite ingresar múltiples entradas y salidas de un sistema. también permite elegir cuántos polos y ceros se desean para la aproximación de la función de transferencia. Matlab otorga el porcentaje de aproximación de la función de transferencia.

Para obtener la función de transferencia del sistema se ingresó un vector con todas las entradas que se analizaran y cómo reaccionó el cuarto a las múltiples señales de entrada. Luego de obtener la función de transferencia de la habitación se invirtió la función de transferencia para así tener una función de transferencia inversa a la de la habitación. Se utilizaron los coeficientes de la función de transferencia invertida para obtener un filtro que quitara la reverberación. Esto se hizo con la función "filter" de matlab.

En la herramienta de identificación de sistemas Matlab tiene la opción de seleccionar cuántos ceros y cuántos polos queremos que nuestra estimación de función de transferencia

tenga. Para estas pruebas se seleccionara no tener ningún cero en la función en la función de transferencia y la cantidad de polos que logren tener una buena aproximación al modelo de la función entrante. Esto con el fin de al momento de invertir la función de transferencia poder tener un filtro FIR. Matlab indica que tan ajustada es la aproximación en porcentaje, se busca tener el mejor porcentaje de aproximación.

Para poder hacer uso de esta aplicación es necesario que nuestro sistema sea lineal, por lo tanto en este método deconvolutivo no se puede probar una señal de ruido blanco. Estas pruebas se realizaron con señales diente de sierra y señales sinusoidales a diferente frecuencia.

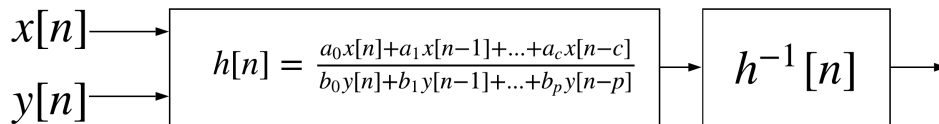


Figura 28: Diagrama de bloques para función de transferencia inversa.

En la primera prueba se tomaron señales diente de sierra a distas frecuencia. Se fue ajustando el número de polos para obtener un porcentaje. En Figura 29 se puede observar el error cuadrático medio que se obtuvo al intentar deconvolucionar la función perturbada mediante este método. En la herramienta de identificación de sistemas se determinó que para esta función en específico la cantidad de polos es de cinco. con cuatro polos y ningún cero se obtuvo un ajuste del 52 %. La función de transferencia en tiempo discreto obtenida se puede ver en Ecuación 21, con lo cual se pudo obtener de forma fácil su inversa para crear el filtro FIR. El error cuadrático medio utilizando de la señal reconstruida fue demasiado elevado. Esto pudo haber sido debido a que el porcentaje del modelo no fue lo suficientemente ajustado.

$$H(Z) = \frac{-2.328E^{-5}}{1 - 3.927Z^{-1} + 5.829Z^{-2} - 3.876Z^{-3} + 0.9735Z^{-4}} \quad (21)$$

$$H(Z)^{-1} = \frac{1 - 3.927Z^{-1} + 5.829Z^{-2} - 3.876ZZ^{-3} + 0.9735Z^{-4}}{-2.328E^{-5}} \quad (22)$$

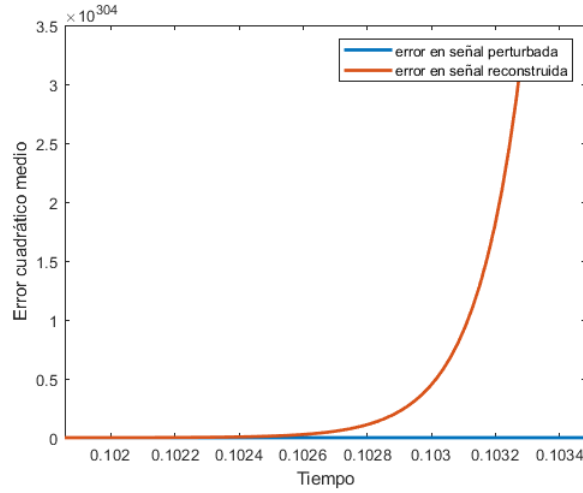


Figura 29: Error cuadrático medio para una señal sinusoidal a 1500Hz

Debido a que este método no funcionó con una señal diente de sierra se probó haciendo uso de señales sinusoidales a diferentes frecuencias. En el caso que se muestra en Figura 30 es una señal sinusoidal a una frecuencia de 1500Hz. Para esta señal se seleccionó que tuviera cinco polos y ningún cero. Con la selección de estos parámetros en la herramienta de Matlab de identificación de sistemas se obtuvo una función de transferencia ajustada a un 95 %. La función de transferencia obtenida se puede ver en Ecuación (23), la cual sirvió para saber la función de transferencia inversa. Sin embargo a pesar de un porcentaje de ajuste alto, este método no funcionó para esta señal.

$$H(Z) = \frac{0.00325}{1 + 0.7408Z^{-1} - 1.544Z^{-2} + 1.541Z^{-3} + 0.7414Z^{-4} + 0.996Z^{-5}} \quad (23)$$

$$H(Z)^{-1} = \frac{1 + 0.7408Z^{-1} - 1.544Z^{-2} + 1.541Z^{-3} + 0.7414Z^{-4} + 0.996Z^{-5}}{0.00325} \quad (24)$$

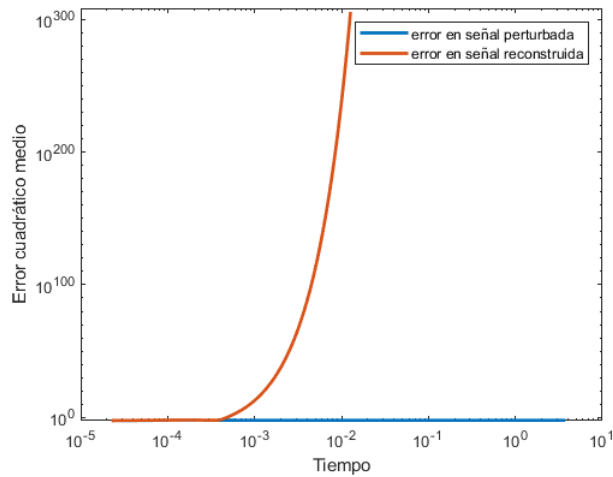


Figura 30: Error cuadrático medio para una señal sinusoidal a 1500Hz

### 8.3.1. Resultados

En el Cuadro 5 se puede ver que para todas las señales el error de la señal reconstruida crece a un valor muy grande a pesar que como se vio en Figura 30 a pesar que el la estimación de la función de transferencia fue alta esto no ayudó a que se pudiera eliminar la reverberación acústica. En síntesis este método no funciona para obtener una deconvolución acústica sobre una señal de audio.

Función	Error MSE de señal reconstruida
WN	NA
st 250	inf
st 500	inf
st 1000	inf
st 1500	inf
st 2000	inf
st 3000	inf
st 6000	inf
st 20000	inf
sine 250	inf
sine 500	inf
sine 1000	inf
sine 1500	inf
sine 2000	inf
sine 3000	inf
sine 6000	inf

Cuadro 5: Resultados utilizando el método de identificación de sistemas

---

## Deconvolución mediante filtro adaptativo LMS.

---

Para este método se elaboró un algoritmo para un filtro adaptativo LMS. Este algoritmo se realizó en el software de Matlab. Para este método es necesario conocer la señal deseada. El algoritmo implementado recibe como parámetros de entrada 2 señales, la señal deseada y la señal perturbada. Este filtro compara la señal deseada con la señal perturbada por la reverberación acústica de la habitación. Al ser comparadas se obtiene un error. conociendo el error se obtienen los coeficientes necesarios para un filtro FIR que se adapta al sistema.

Se realizaron pruebas con distintas señales. con las señales a las que se les pudo eliminar la reverberación acústica de forma significativa mediante el filtro adaptativo LMS, se les agrego una prueba extra. esta prueba extra consiste en agarrar los coeficientes encontrados con el filtro adaptativo LMS y utilizarlo en un filtro FIR.

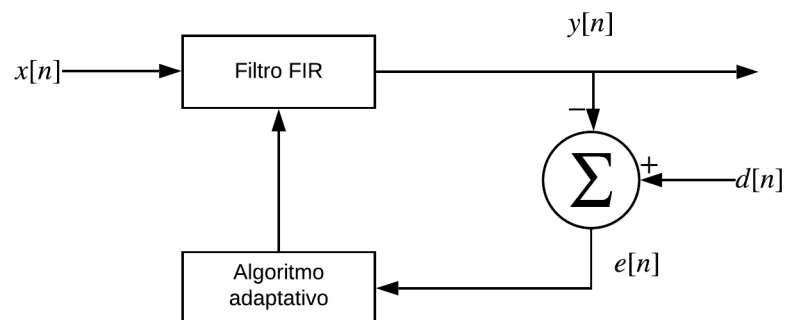
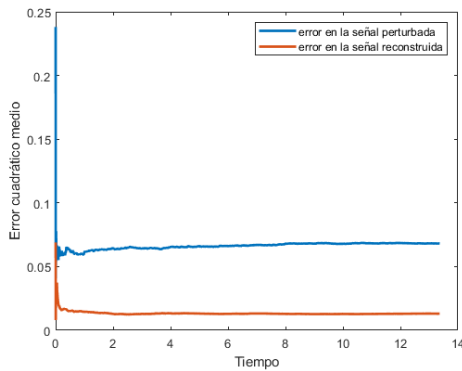


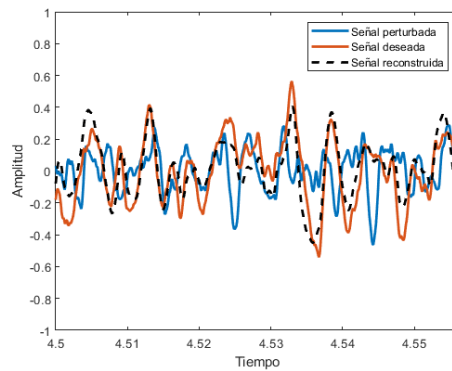
Figura 31: Diagrama de bloques filtro adaptativo LMS.

Para la primera prueba de la implementación de este filtro adaptativo se selecciono una

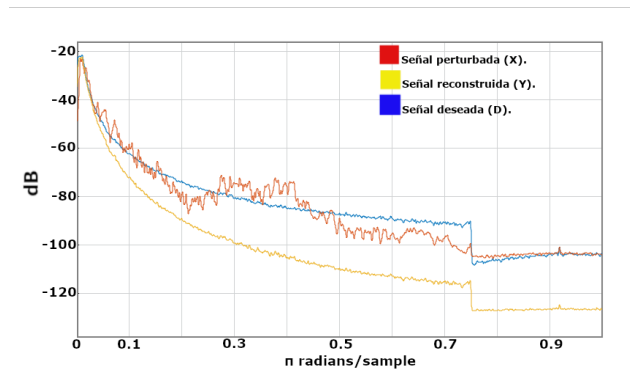
señal de ruido blanco. En Figuras 32a, 32b y 32c vemos que el error cuadrático medio disminuye considerablemente. Esto es un buen indicador de que el filtro adaptativo LMS pueda funcionar como un algoritmo deconvolutivo. Si se observa detenidamente la comparación de la forma de la onda, es notable la mejora que existe entre la señal perturbada y la señal reconstruida. En Figura 32c siendo  $d$  la señal deseada (color azul),  $x$  la señal perturbada (color rojo) y la señal saliente del filtro como  $y$  (color amarillo), se puede ver que este método agrega un filtro pasa bajas. El filtro adaptativo LMS es un filtro adaptativo lineal el cual se basa en un filtro FIR. El haber podido reconstruir una señal de proceso estocástico permite entender que las perturbaciones que se están eliminando son lineales.



(a) MSE Reconstrucción de una señal de ruido blanco.



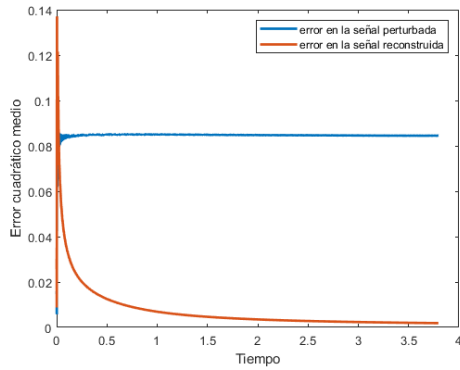
(b) Comparación de reconstrucción de una señal de ruido blanco.



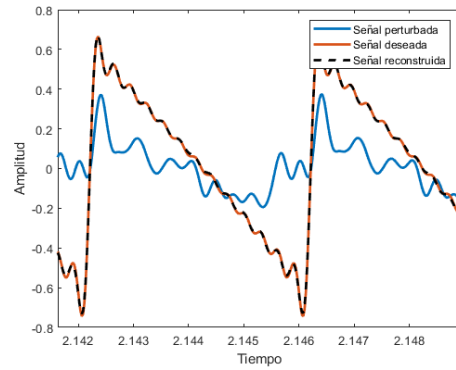
(c) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal de ruido blanco.

Figura 32: Reconstrucción de una señal de ruido blanco utilizando filtro adaptativo LMS

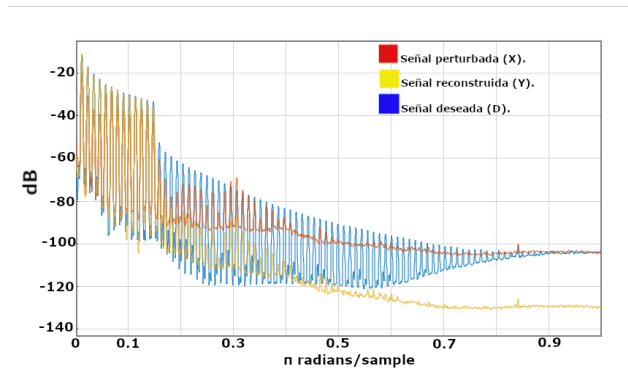
Se realizaron más pruebas con este método, se probaron señales diente de sierra y señales sinusoidales a distas frecuencias. En Figura 33a se aprecia el error cuadrático medio en la reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250HZ. Se puede ver que el error disminuyó un montón comparado con el de la señal perturbada. También en Figura 33b se ve que la señal reconstruida es idéntica a la señal deseada.



(a) MSE Reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.



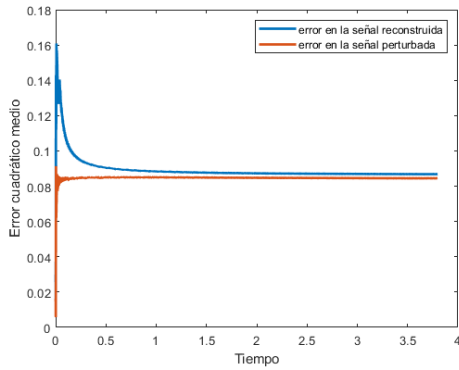
(b) Comparación de reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.



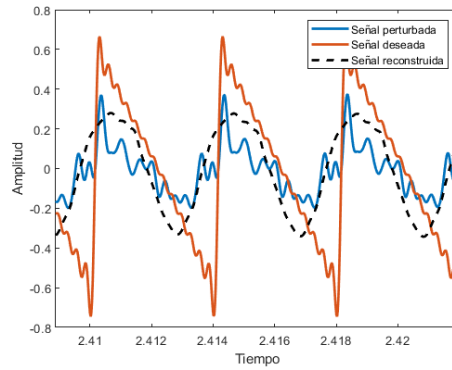
(c) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.

Figura 33: Reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz utilizando filtro adaptativo LMS

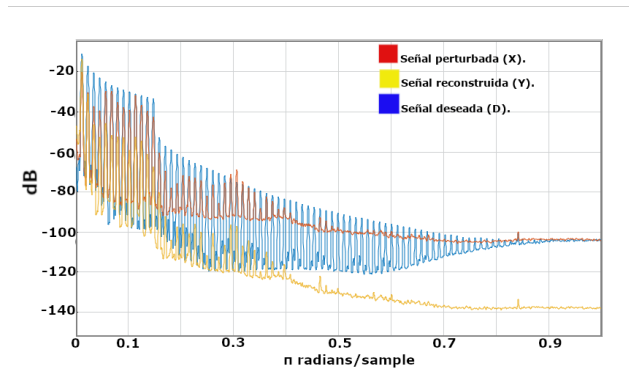
Habiendo visto que el filtro adaptativo LMS funciona bien para la eliminación de reverberación acústica se probó entrenar al filtro con una señal para obtener los coeficientes de un filtro FIR y con los datos obtenidos filtrar una señal distinta. Para este caso se tomaron los coeficientes encontrados en el proceso deconvolutivo para una señal de ruido blanco y se colocaron dentro de un filtro FIR para señales diente de sierra y señales sinusoidales a distintas frecuencias. En Figuras 34a y 34b se puede ver que el error cuadrático medio no cambió de forma significativa y el la forma de la onda de la señal reconstruida no se parece. También en Figura 34c se observa de nuevo que este método al igual que con los coeficientes variables del filtro LMS presenta un filtro pasa bajas en su salida.



(a) MSE Reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.



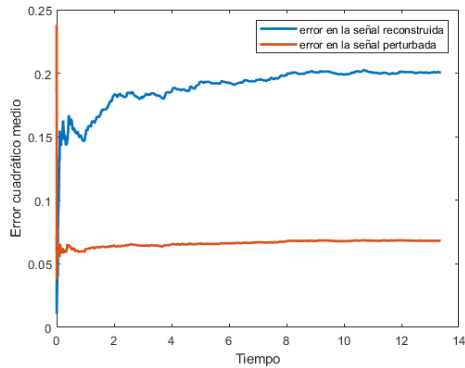
(b) Comparación de reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.



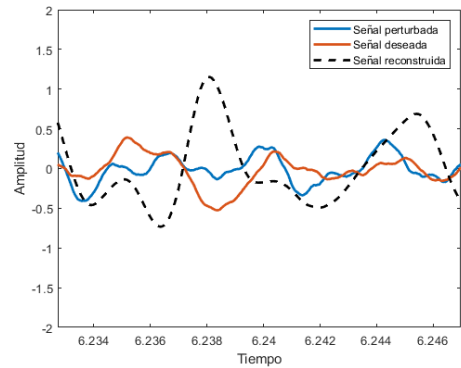
(c) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz.

Figura 34: Reconstrucción de una señal diente de sierra con frecuencia de 250Hz utilizando filtro FIR con coeficientes encontrados con filtro adaptativo LMS

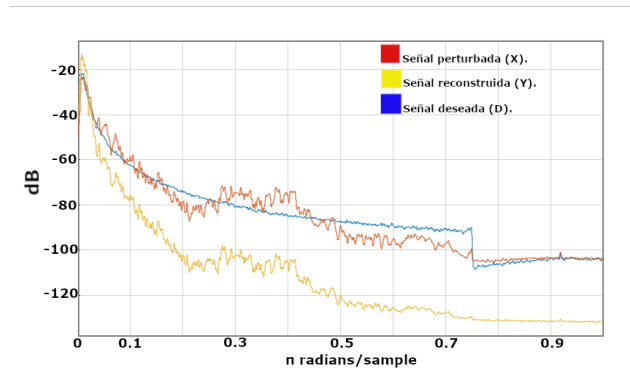
El intentar deconvolucionar una señal utilizando un filtro FIR con los coeficientes encontrados utilizando otra señal mediante un filtro adaptativo LMS no funcionó como se esperaba. Debido a esto se probó eliminar la reverberación acústica utilizando un filtro FIR con la misma señal con la que se encontraron los coeficientes utilizando el filtro adaptativo LMS. Es decir se tomaron los coeficientes de un filtro LMS para una señal de ruido blanco y se utilizaron para un filtro FIR en una señal de ruido blanco. Se puede ver en Figuras 35a y 35b que tanto el error cuadrático medio como la forma de la onda empeoran al aplicar el filtro FIR. También en el espectro de frecuencias de Figura 35c se aprecia que la salida del filtro presenta un filtro pasa bajas.



(a) MSE Reconstrucción de una señal de ruido blanco.



(b) Comparación de reconstrucción de una señal de ruido blanco.



(c) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal de ruido blanco.

Figura 35: Reconstrucción de una señal de ruido blanco utilizando filtro FIR con coeficientes encontrados con filtro adaptativo LMS

## 9.1. Resultados con la implementación de filtro LMS y filtro FIR.

Tanto los resultados del filtro adaptativo LMS y del filtro FIR con los coeficientes encontrados con el filtro adaptativo LMS, se pueden observar en Cuadro 6. Viendo el cuadro se puede apreciar que el error disminuye de forma significativa cuando se aplica el filtro adaptativo LMS. Lo contrario al utilizar el filtro FIR, el error en estas pruebas es más alto al de la señal ya perturbada.

Al observar las figuras 32 y 33 se nota de forma clara que el filtro adaptativo LMS fue exitoso para la de-reverberación acústica, más bien si se observa Figuras 32c y 33c, donde la  $x$  es la señal perturbada,  $d$  la señal deseada e  $y$  el resultado del filtro se puede notar que existe un ligero filtro pasa bajas en la respuesta del filtro adaptativo.

Al observar las figuras 34 y 35 se puede decir que el filtro FIR, utilizando los coeficiente encontrados mediante el filtrado adaptativo, no tuvo éxito. En 34c y 34c se observa que en este método también se tiene un filtro pasa bajas.

Funcion	Mse señal perturbada	MSE filtro LMS	MSE filtro FIR
WN	0.0681	0.0202	0.146
st 250	0.0845	0.0014	0.165
st 500	0.0753	2.20E-03	0.135
st 1000	0.0938	0.00458	0.156
st 1500	0.0756	0.0067	0.189
st 2000	0.087	0.0054	0.242
st 3000	0.0883	0.0026	0.182
st 6000	0.0763	0.0011	0.179
st 20000	0.0986	0.0065	0.263
sine 250	0.0036	7.43E-04	0.234
sine 500	0.0089	6.34E-04	0.245
sine 1000	0.0063	7.80E-03	0.266
sine 1500	0.0075	9.65E-04	0.184
sine 2000	0.0056	8.63E-04	0.165
sine 3000	0.074	9.59E-03	0.245
sine 6000	0.061	9.53E-03	0.146

Cuadro 6: Resultados utilizando filtro adaptativo y sus coeficientes encontrados.

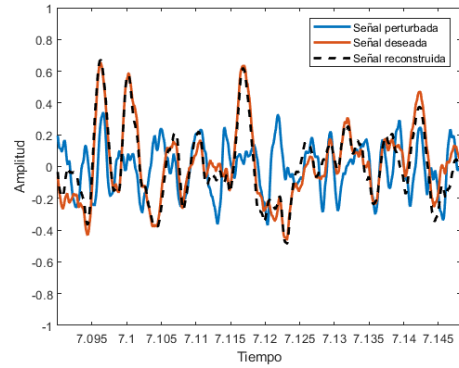
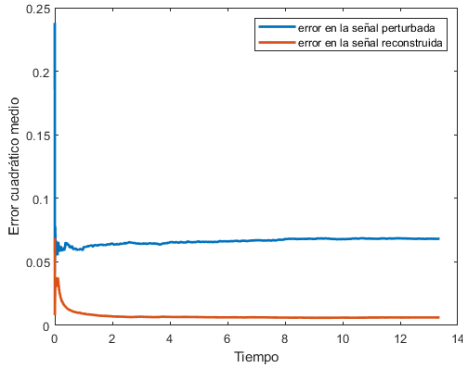
---

### Deconvolución mediante la implementación de filtro no lineal adaptativo LMS de Volterra.

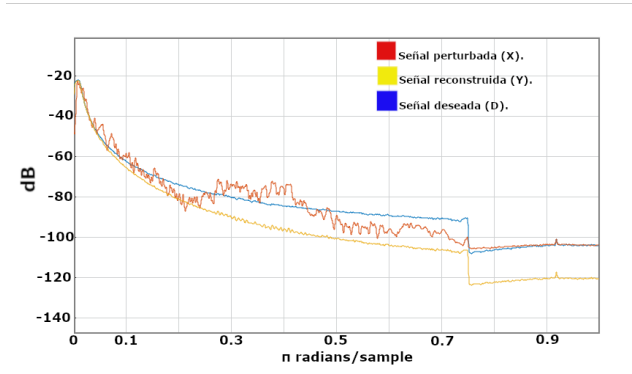
---

Para este método se implementó un algoritmo de un filtro adaptativo no lineal en Matlab. El filtro seleccionado fue el filtro adaptativo de segundo de Volterra LMS. Esto con el fin de descartar posibles no linealidades en la reverberación de la habitación. Este filtro es muy parecido al filtro adaptativo LMS basado en el un filtro lineal FIR, con la diferencia que este agrega no linealidades de forma selectiva. Se esperaría que este filtro adaptativo no lineal funcionara de mejor forma o al menos igual que el filtro adaptativo LMS.

Para este método se utilizaron distintos tipos de señales. Se utilizaron señales de ruido blanco, diente de sierra a distintas frecuencias y señales sinusoidales a distintas frecuencias. En el Figura 36 se observa el comportamiento de este filtro no lineal sobre una señal de ruido blanco. En Figura 36a se aprecia que el error de la señal reconstruida disminuyó significativamente respecto de la señal ya perturbada. En Figura 36b se puede corroborar que en efecto la señal reconstruida se parece por mucho a la señal deseada que la señal perturbada, esto quiere decir que el este método es efectivo para eliminar la reverberación acústica.



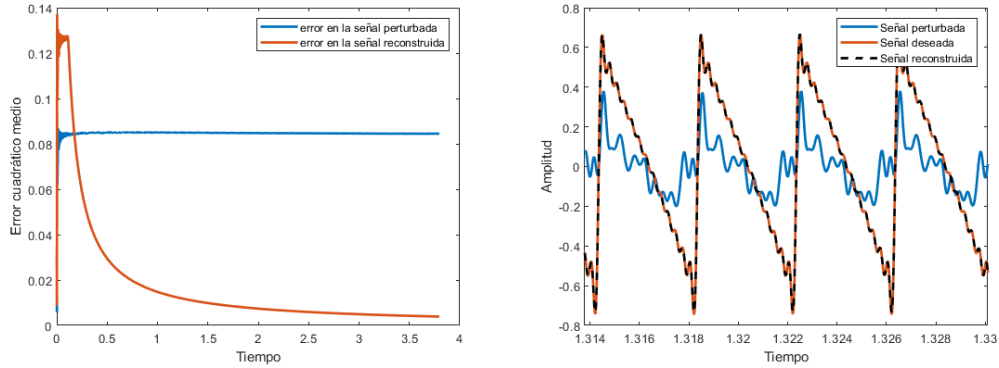
(a) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal de ruido blanco. (b) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal de ruido blanco.



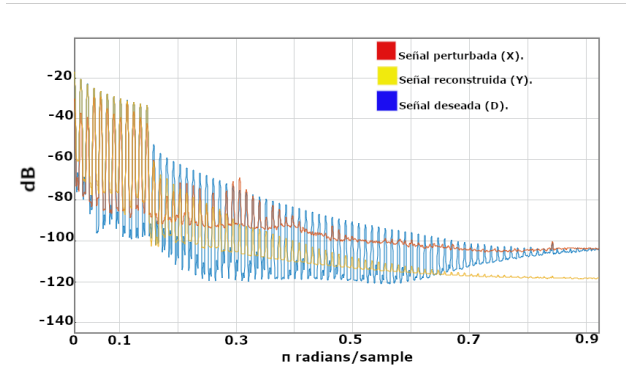
(c) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal de ruido blanco.

Figura 36: Reconstrucción de una señal de ruido blanco utilizando filtro adaptativo de segundo de Volterra LMS

En Figura 37 se observa la prueba realizada para una señal diente de sierra con una frecuencia de 250Hz. Al igual que para la señal de ruido blanco esta prueba fue exitosa. En Figura 37a se observa que el error cuadrático medio disminuye de forma considerable. También la forma de la onda en Figura 37b se aprecia que la señal reconstruida es idéntica a la señal deseada. Sin embargo en la gráfica de error cuadrático medio se ve que la señal converge de forma lenta. También es relevante destacar que para la prueba con la señal de ruido blanco y con la señal diente de sierra la respuesta del filtro muestra un filtro pasa bajas, esto se puede apreciar en Figuras 36c y 37c.



(a) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal diente de sierra a 250Hz. (b) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal diente de sierra a 250Hz.



(c) Espectro de frecuencias en reconstrucción de una señal diente de sierra a 250Hz.

Figura 37: Reconstrucción de una señal diente de sierra a 250Hz utilizando filtro adaptativo de segundo de Volterra LMS

## 10.1. Resultados

Los resultados en Cuadro 7 muestran resultados satisfactorios para el filtro de adaptativo de LMS de Volterra, ya que el error cuadrático medio disminuye de forma significativa para las señales reconstruidas. En Figuras 36 y 33 se ve claramente una mejor mejora en la forma de la señal reconstruida respecto de la señal perturbada. Así mismo se puede ver la comparación del error cuadrático medio de la señal reconstruida y el de la señal perturbada. El error disminuyó en la señal reconstruida. Si se observa la comparación del espectro de las 3 señales en Figura 37c, donde  $x$  es la señal perturbada,  $d$  es la señal deseada y  $y$  la señal reconstruida, que el espectro de la señal reconstruida tiene una forma parecida al espectro de la señal deseada, sin embargo pareciera que se tiene un filtro pasa bajas.

Cabe mencionar que a pesar que este filtro adaptativo ayuda a eliminar las perturbaciones causadas por la reverberación acústica de la habitación, es muy ineficiente. El algoritmo tarda demasiado tiempo en finalizar el proceso. También es necesario decir que los resultados del filtro LMS fueron mejores a este.

Función	Mse señal perturbada	Error mse señal reconstruida
WN	0.0681	0.0255
st 250	0.0845	0.016
st 500	0.0753	3.45E-03
st 1000	0.0938	0.00563
st 1500	0.0756	0.0071
st 2000	0.087	0.0049
st 3000	0.0883	0.0029
st 6000	0.0763	0.0021
st 20000	0.0986	0.0067
sine 250	0.0036	7.55E-04
sine 500	0.0089	7.01E-04
sine 1000	0.0063	7.92E-03
sine 1500	0.0075	9.68E-04
sine 2000	0.0056	7.98E-04
sine 3000	0.074	9.45E-03
sine 6000	0.061	9.33E-03

Cuadro 7: Resultados filtro adaptativo LMS de Volterra

Los métodos deconvolutivos utilizando la función de Matlab “Deconv”, realizando división en el dominio de frecuencia, y utilizando identificación de sistemas deben ser descartados ya que el error de la señal reconstruida es mayor que el error de la señal ya perturbada siendo todo lo contrario a lo que se busca lograr. Para todas las pruebas realizadas utilizando la función “deconv” e identificación de sistemas dieron un resultado de mse demasiado alto tendiendo a infinito, también que los resultados de mse utilizando división en el dominio de la frecuencia fue en algunos casos menor al de la señal deseada la forma de la onda no era parecida y en su mayoría de pruebas el mse fue mayor al de la señal perturbada.

Los métodos de filtrado adaptativo fueron de total éxito ya que se logró reducir el error y realizar una buena reconstrucción de las señales. Sin embargo al utilizar los coeficientes encontrados en el caso del filtro adaptativo LMS en un filtro FIR no resultó tener éxito. Por lo tanto se puede dar por descartado el uso de un filtro FIR. Para todos los resultados utilizando el filtro adaptativo LMS se obtuvo un mse considerablemente menor al de la señal perturbada y también se obtuvo una forma de la onda mucho más parecida a la señal deseada que la señal perturbada. En todas las pruebas realizadas con el filtro FIR dieron un resultado mayor en su mse que el de la señal perturbada.

Ambos métodos, utilizando filtro adaptativo LMS y filtro adaptativo LMS de Volterra fueron exitosos y es necesario determinar cuál de estos es más eficiente para la aplicación buscada. Los resultados de ambos filtros resultan ser muy similares en su mse, ambos siendo mejor que el mse de la señal perturbada, pero el filtro lineal LMS converge a una respuesta más rápida que el filtro LMS de Volterra. En las gráficas de mse de Figuras del Capítulo 10 se puede apreciar que existe un retardo al converger. Por lo tanto el mejor método para la deconvolución de una habitación sin tratamiento acústico es el uso de un filtro adaptativo LMS.



---

### Recomendaciones

---

Se recomienda para una segunda fase utilizar redes neuronales combinado con filtros LMS. Esto para poder obtener un aprendizaje de la habitación a deconvolucionar y abarcar las no linealidades y varianzas en el tiempo que puedan presentarse. Aunque se logró eliminar la reverberación no se logró un aprendizaje para el filtro, obligando a tener siempre una señal deseada como referencia.

Para próximas revisiones del proyecto sería conveniente que señal deseada pueda ser grabada en espacio sin reverberación. Esto con el fin de tener una referencia de un espacio con tratamiento acústico. Con esta señal se tendría la ventaja que el filtro no tendría que eliminar el ruido causado por el micrófono. También utilizar una señal limpia y verificar si existe alguna mejora comparada con una señal grabada en estudio.

Para las bocinas a utilizar sería bueno que se utilizaran monitores profesionales de audio ya que estos presentan una respuesta más plana. Si se puede también sería bueno contrastar entre distintos tipos de bocinas y compararlo con sus características.



- [1] Y. Lin y D. D. Lee, “Relevant deconvolution for acoustic source estimation”, en *Proceedings.(ICASSP'05). IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005.*, IEEE, vol. 5, 2005, págs. v-529.
- [2] A. Stenger y R. Rabenstein, “Adaptive Volterra filters for nonlinear acoustic echo cancellation.”, en *NSIP*, 1999, págs. 679-683.
- [3] G. Dijk, *Distribution theory: convolution, Fourier transform, and Laplace transform*. Walter de Gruyter, 2013.
- [4] S. Fickas, G. Kortuem y Z. Segall, “Software organization for dynamic and adaptable wearable systems”, en *Digest of papers. First international symposium on wearable computers*, IEEE, 1997, págs. 56-63.
- [5] T.-h. Kim, H. Adeli, R. J. Robles y M. Balitanas, *Ubiquitous Computing and Multimedia Applications: Second International Conference, UCMA 2011, Daejeon, Korea, April 13-15, 2011. Proceedings*. Springer, 2011, vol. 151.
- [6] A. Farina, “Advancements in impulse response measurements by sine sweeps”, en *Audio Engineering Society Convention 122*, Audio Engineering Society, 2007.
- [7] L. Justen, *Blind deconvolution: Theory, regularization and applications*. Shaker Verlag, 2006.
- [8] L. Ljung y T. Söderström, *Theory and practice of recursive identification*. MIT press, 1983.
- [9] S. C. Douglas, “Introduction to adaptive filters”, *Digital signal processing handbook*, págs. 7-12, 1999.
- [10] M. Grimble y M. Johnson, *Advanced textbooks in control and signal processing*, 2013.

