

# REVERBERADOR DE SCHROEDER

Guido Santoro<sup>1</sup> y Martin Nocito<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Tres de Febrero  
santoro24684@estudiantes.untref.edu.ar

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Tres de Febrero  
mnocito8@gmail.com

**Resumen** — *A partir del trabajo de M. R. Schroeder se implementan distintas configuraciones para obtener un reverberador artificial que emule de forma satisfactoria la respuesta de un recinto real. A partir de los filtros peine IIR y filtros pasa-todo se plantean elecciones de los distintos parámetros y rediseño de los sistemas. Al comparar cada uno de los diseños, se concluye que una configuración con 64 filtros peine (en serie con un pasa bajos) en paralelo y con 16 filtros pasa-todo en serie permiten obtener un reverberador digital con resultados satisfactorios.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo del procesamiento digital de señales, el diseño de efectos temporales es un área de sumo interés. La reverberación artificial es uno de estos efectos. El primer desarrollo de una reverberación artificial se debe a M. R. Schroeder [1], a partir de la cual se diseñaron muchos de los reverberadores artificiales utilizados comercialmente en la actualidad [2].

En el presente trabajo se estudian las diferentes configuraciones originales propuestas, se distinguen los distintos filtros y sistemas utilizados para luego detectar los posibles problemas de sus desarrollos y plantear mejoras al diseño.

En primer lugar se presenta una descripción teórica de los sistemas que se utilizarán. Luego, se implementan las distintas configuraciones desarrolladas por M. R. Schroeder y las mejoras propuestas en el presente trabajo. Por último se presentan los resultados y conclusiones.

## 2. MARCO TEÓRICO

M. R. Schroeder propuso distintos diseños para un reverberador artificial. Partiendo del análisis del comportamiento modal de una sala, detectó que con un filtro peine de respuesta al impulso infinita podía emularse uno de los modos del recinto, es decir, una onda sonora reflejándose entre paredes paralelas[3]. Estos filtros tienen un diagrama en bloques como se muestra en la Figura 1.

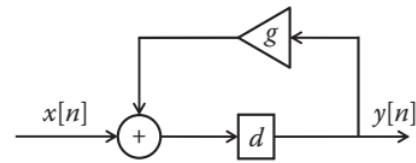


Figura 1: Diagrama en bloques de un filtro peine IIR.

Su función de transferencia es

$$H(z) = \frac{z^{-D}}{1 - g z^{-D}} \quad (1)$$

En la Figura 2 se muestra un diagrama de polos en el plano  $z$  para  $D = 10$  y  $g = 0,7$ .

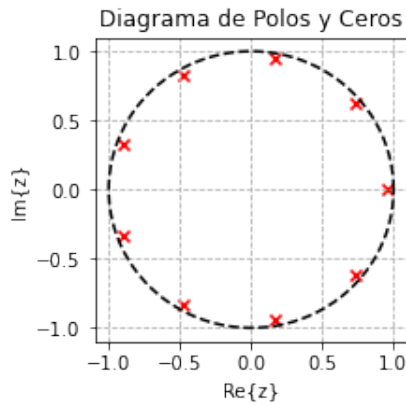


Figura 2: Diagrama de polos (cruz roja) de un IIR COMB.

Reemplazando  $z$  por  $e^{j\omega}$  en 1 se obtiene la respuesta en frecuencia del filtro. Al tomar el valor absoluto, se tiene la magnitud de  $H(e^{j\omega})$ , tal como se muestra en la Figura 3.

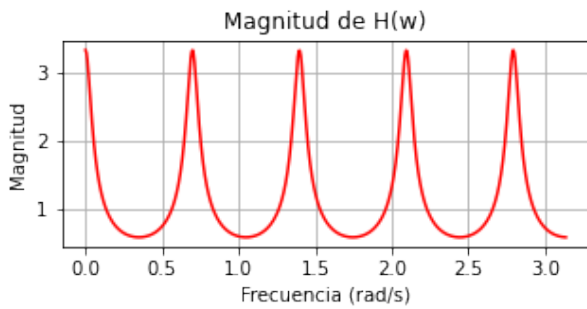


Figura 3: Magnitud de  $H(e^{j\omega})$

Se muestra en la Figura 4 la respuesta al impulso de este filtro.

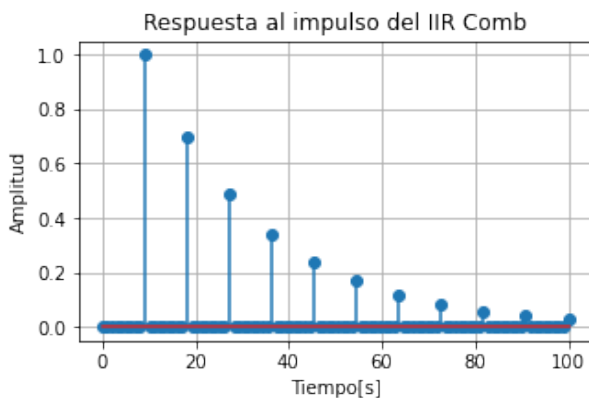


Figura 4: Respuesta al impulso del filtro IIR COMB.

Schroeder notó que modificando este filtro peine podía obtener un filtro pasa-todo, cuya magnitud de su res-

puesta en frecuencia es constante. El diagrama en bloques de este filtro se muestra en la Figura 5.

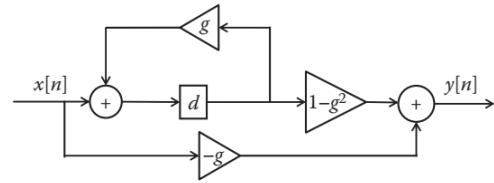


Figura 5: Diagrama en bloques para un filtro pasa-todo.

La función transferencia obtenida es:

$$H(z) = \frac{g + z^{-D}}{1 + g z^{-D}} \quad (2)$$

Para un retraso  $D = 10$  muestras y una ganancia  $g = 0,7$  se obtiene el diagrama de polos y ceros mostrado en la Figura 6.

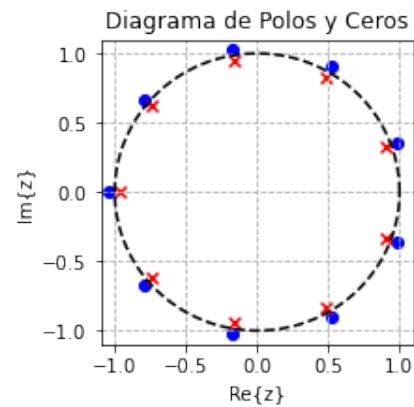


Figura 6: Diagrama de polos (cruz roja) y ceros (punto azul) para un filtro pasa-todo.

Se aprecia que, a diferencia del filtro peine IIR, a cada polo corresponde su cero en el valor inverso, lo cual es característico de los sistemas pasa-todo. Se distinguen también en que el pasa todo no tiene un polo (y por ende un cero) en  $z = 1$  sino en  $z = -1$ . Cabe destacar que los polos de ambos sistemas están dentro de la circunferencia unidad, lo cual hace que sean estables (ya que son causales).

Nuevamente puede obtenerse la magnitud de la respuesta en frecuencia, tal como se muestra en la Figura 7.

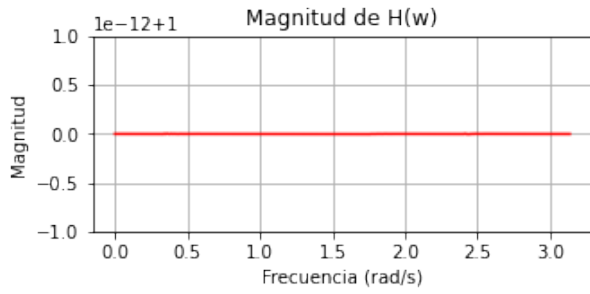


Figura 7: Magnitud de la respuesta en frecuencia para un filtro pasa-todo.

Tal como se esperaba, la magnitud es constante en todo el espectro.

La respuesta al impulso del filtro pasa-todo se muestra en la Figura 8.

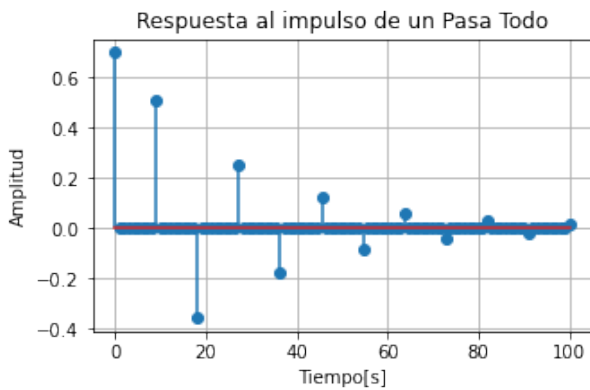


Figura 8: Respuesta al impulso del filtro pasa-todo.

Sabiendo que el retardo de grupo es

$$GD\{H\} = \frac{-d\angle H(e^{j\omega})}{d\omega} \quad (3)$$

pueden compararse los retardos de grupo de ambos filtros bajo los mismos parámetros antedichos. Se aprecia que las bandas de frecuencias afectadas por cada uno son complementaria, es decir, donde el retardo de grupo del filtro peine es mínima, el del pasa todo es máximo. Esto se debe a que, como se adelantó, la ubicación de los polos es idéntica excepto por la del polo del eje real. También se aprecia que la demora para el pasa-todo es mayor, tal como se muestra en la Figura 9. Es decir que si bien la magnitud es constante para todo el espectro, el retardo de grupo es similar al del filtro peine IIR, por lo tanto puede adelantarse que para retardos perceptibles por el oído humano va a notarse una coloración [1].

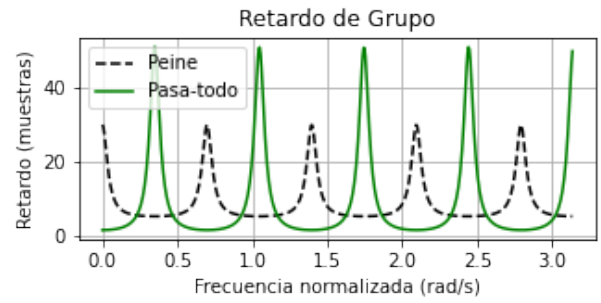


Figura 9: Retardo de grupo para filtro peine (-) y filtro pasa-todo (-)

### 3. PROCEDIMIENTO

A continuación se detallan todas las implementaciones realizadas para distintas configuraciones de un reverberador digital para un posterior análisis y comparación de las mismas.

Se utilizó una notebook *Dell Inspiron 1525* con 3 GB RAM, procesador de 2 GHz, Windows 7 32-bit. La versión utilizada es Python 3.8. Todos los filtros se implementaron a través de su función transferencia, utilizando la función *lfilter* del módulo *signal* de *scipy* se filtra la señal deseada. También se utilizaron las librerías *Numpy*, *soundfile*, *matplotlib*, *IPython*.

#### 3.1. FILTROS PEINE Y PASA TODO

En primer lugar, se implementó un filtro peine de respuesta al impulso infinita. Los parámetros utilizados fueron un retraso de 45 ms y una ganancia de retroalimentación de 0.7.

Luego se implementó un filtro pasa-todo. Los parámetros utilizados son los mismos: un retardo de 45 ms y una ganancia  $g = 0,7$ .

#### 3.2. SCHROEDER: PRIMERA VERSIÓN

La primera versión del reverberador de Schroeder consta de 5 filtros pasa-todo en serie, tal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10: Diagrama en bloque de la primera versión de Schroeder

Los parámetros utilizados son los que figuran en el diagrama en bloques, es decir, los propuestos originalmente por Schroeder [1].

#### 3.3. SCHROEDER: SEGUNDA VERSIÓN

La segunda versión desarrollada por Schroeder consta de 4 filtros peine en paralelo, seguidos por 2 filtros pasa-

todo, tal como se muestra en la Figura 11.

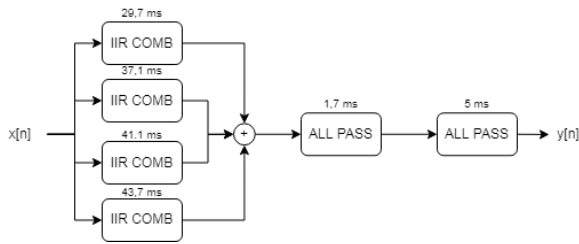


Figura 11: Diagrama en bloques para la segunda versión de Schroeder

Los parámetros de retardo utilizados son los que figuran en el diagrama en bloques. Las ganancias se tomaron como  $g = 0,7$ . Estos valores son los sugeridos por Schroeder[4].

### 3.4. OTRAS IMPLEMENTACIONES

Se optó por rediseñar estos reverberadores a partir del algoritmo original pero con algunas modificaciones sugeridas en la literatura [5],[6].

#### 3.4.1. VERSIÓN 1

Esta versión es igual al segundo diseño de Schroeder pero permite elegir una cantidad arbitraria de filtros peine en paralelo y de filtros pasa-todo en serie. Además se utiliza una variable aleatoria uniforme para los retardos de cada filtro. Los filtros peine tienen valores que oscilan entre los 35 y los 50 ms, mientras que los pasa-todo varían entre los 1,7 y los 5 ms. El sustento teórico para esta decisión es que si los retardos son múltiplos, se tendrá una distribución dispar de decaimientos en tiempo, lo cual se percibe como flutter echo y/o una coloración metálica en el sonido. Es deseable que los retardos sean números primos y/o no correlacionados [1].

Los parámetros utilizados fueron 32 filtros peine en paralelo con ganancia  $g = 0,8$  y 8 filtros pasa-todo en serie con ganancia  $g = 0,3$ , tal como se recomienda en [4].

#### 3.4.2. VERSIÓN 2

La segunda versión consta del mismo código, pero se le adiciona un filtro Butterworth pasa bajos de primer orden en la salida de cada uno de los filtros peine, a diferencia de las implementaciones existentes (como la de Moorer [7]) en las cuales el pasa bajo se encuentra en la rama de retroalimentación de cada filtro peine. Hubiera sido deseable implementarlo de esta manera dado que, para cada reflexión, el contenido de alta frecuencia disminuya. El efecto de filtrar a la salida es distinto, pero no fue posible implementar el código. El diagrama en bloques se muestra en la Figura 12.

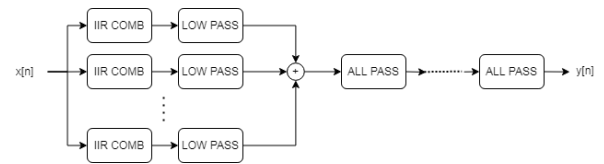


Figura 12: Diagrama en bloques de la implementación con filtro pasa-bajos

Los parámetros de retardo se plantean de igual manera que la Versión 1, la cantidad de filtros peine utilizada es de 64 y una ganancia de 0.8, y la cantidad de pasa-todo es de 16 con una ganancia de 0.8. La frecuencia de corte del filtro pasa bajos de primer orden se estableció en 4 kHz.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la presente sección se muestran los resultados para cada una de las configuraciones implementadas. La señal utilizada para testear cada configuración es un sample de tambor cuya forma de onda se muestra en la Figura 13. Todos los resultados se presentan en forma 100 % wet, es decir, no se realizó una combinación de la señal original y la señal filtrada.

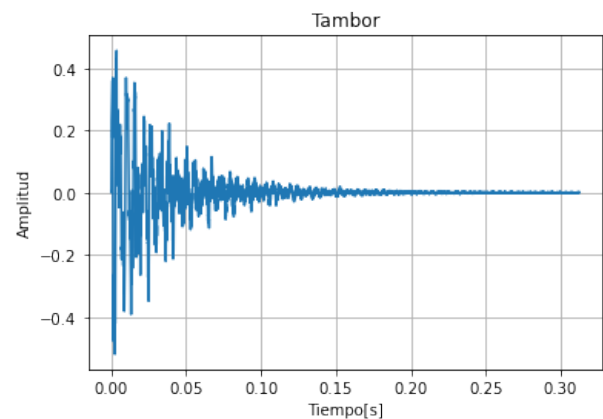


Figura 13: Señal de tambor elegida para testear los filtros

### 4.1. FILTROS PEINE Y PASA-TODO

El filtro peine de respuesta al impulso infinita consiste de una serie de repeticiones de la señal original que decaen exponencialmente y equiespaciadas en tiempo, tal como se aprecia en la Figura 14. El efecto obtenido es el de un flutter echo, por eso se dice que representa un modo del recinto, es decir, la onda sonora reflejándose entre dos paredes paralelas. De igual forma, para retardos no perceptibles por el oído humano, se aprecia una coloración. Eso se debe a que la magnitud de la respuesta en frecuencia de estos filtros no es constante. El filtro peine presenta una periodicidad que lo convierte en una reberberación no deseada.

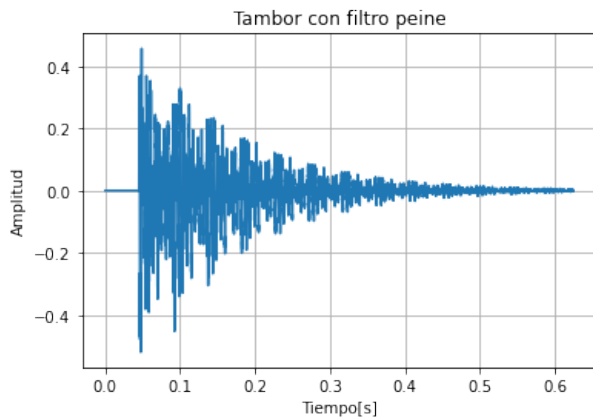


Figura 14: Tambor filtrado con un filtro peine IIR.

Un filtro pasa todo se obtiene modificando el filtro peine de respuesta al impulso infinita, y tiene la particularidad de que la magnitud de su respuesta en frecuencia es constante. A pesar de ello, un retardo mayor a los 5 ms es percibido como flutter echo muy similar al filtro peine (Figura 14). No se consigue una recreación natural del efecto buscado.

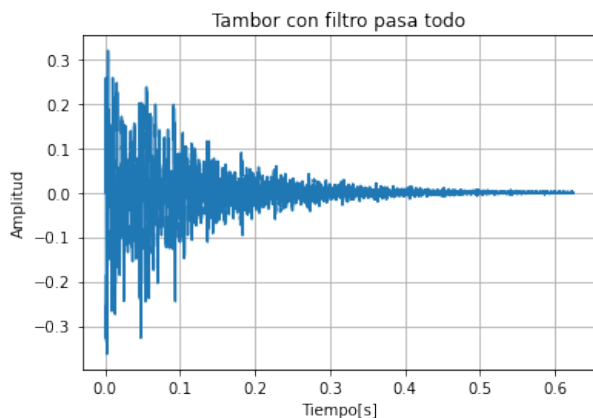


Figura 15: Tambor filtrado con un filtro pasa-todo.

Sin embargo ambos filtros se diferencian marcadamente cuando los tiempos de retardo son menores a los 5 ms, dado que el oído humano integra cada repetición como un mismo sonido. En el caso del filtro peine, al tener una respuesta en frecuencia dispar, se percibe una coloración del sonido original, mientras que para el pasa-todo, la coloración es casi imperceptible. Otra diferencia entre estos sistemas es que el filtro peine aplica un retardo a la señal original (dado que el retardo está puesto en la rama de salida y no en la retroalimentación).

## 4.2. SCHROEDER: PRIMERA VERSIÓN

El resultado obtenido al concatenar 5 filtros pasa-todo en serie es insatisfactorio, dado que la intensidad del campo reverberado tiene un tiempo de crecimiento lento, lo

cual no sucede en los recintos reales (el estado estacionario se alcanza rápidamente en comparación al tiempo de decaimiento). Además, se perciben periodicidades que tampoco son deseadas. De todas formas, esta configuración logra una densidad de reflexiones mayor (la señal tarda aproximadamente 1,5 s en decaer) y por lo tanto una reverberación más real que un filtro peine o un pasa-todo simples. Es por eso que suele llamárselos *difusores de impulso* [3].

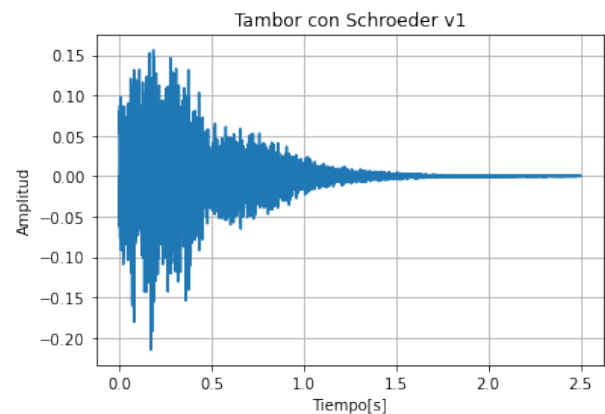


Figura 16: Tambor filtrado con la primera versión de Schroeder.

## 4.3. SCHROEDER: SEGUNDA VERSIÓN

El segundo diseño de Schroeder presenta una mejora sustancial respecto de las configuraciones previamente analizadas debido a la incorporación dos bloques distintos. Con los filtros peine en paralelo, se simulan distintas reflexiones dentro de un recinto, que tendrán distintos retrasos y permiten obtener un decaimiento aproximadamente constante en todo el espectro si los valores de retardo no son múltiplos. Luego, con los filtros pasa-todo, se incorpora la densidad de reflexiones presente en los recintos reales. A pesar de estas mejoras, sigue percibiéndose una componente artificial, con coloración y periodicidad en el decaimiento.

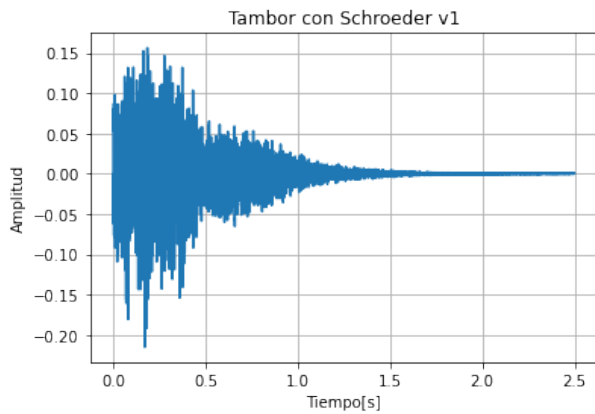


Figura 17: Tambor filtrado con la segunda versión de Schroeder.

## 4.4. OTRAS IMPLEMENTACIONES

### 4.4.1. VERSIÓN 1

La reverberación obtenida es satisfactoria para un número alto de filtros peine y pasa-todo. La diferencia con la configuración original radica en que esta implementación es que permite colocar la cantidad de filtros que se consideren necesarios para mejorar la calidad del algoritmo, a expensas de un incremento en el costo computacional. El hecho de incrementar la cantidad de filtros peine, representa un incremento en las reflexiones del campo reverberado. Además, como los retardos son fijados aleatoriamente, no es probable la existencia de periodicidades que provoquen decaimientos dispares en distintas frecuencias. Incrementando la ganancia de este bloque se obtienen decaimientos más largos. Por otro lado, al incrementar los filtros pasa-todo, se logra una mayor densidad de reflexiones que en la configuración original, por un lado, y por otro lado, se evitan periodicidades con la randomización de los retardos.

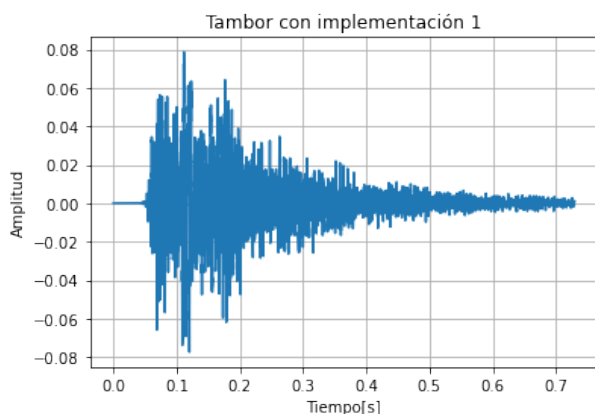


Figura 18: Tambor filtrado con el primer rediseño.

### 4.4.2. VERSIÓN 2

La incorporación del filtro Butterworth denota auditivamente una diferencia con la primer implementación. Puede registrarse la disminución en altas frecuencias, emulando la absorción del aire y las paredes en alta frecuencia, algo presente en la mayoría de los recintos reales. Esta modificación representa una mejora respecto del resto de los sistemas implementados. De todas formas, este reverberador sigue teniendo un carácter artificial dado que es una reverberación de campo difuso, es decir, la cola reverberante sin las reflexiones tempranas.

La elección de los parámetros más óptimos se realizó haciendo una escucha crítica y se llegó a la conclusión de que son necesarios 64 filtros peine, 16 filtros pasa-todo, ambos con una ganancia de 0.8, y una frecuencia de corte de 4 kHz.

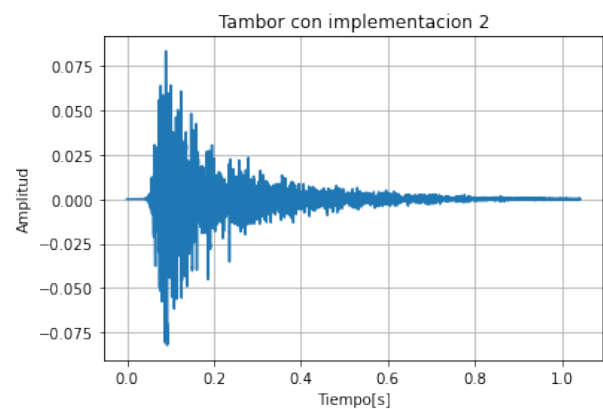


Figura 19: Tambor filtrado con el segundo rediseño.

## 5. CONCLUSIONES

En base a todos los algoritmos planteados se concluye que a medida que se complejiza el diseño, mejor es el resultado, a la vez que se incrementa el costo computacional. De todas las configuraciones probadas, la más satisfactoria a nivel perceptivo es la segunda implementación, que sigue los lineamientos del diseño de Moorer. Se corroboró que al incrementar la cantidad de filtros peine en paralelo, se logran decaimientos más parejos en todo el espectro, y al incrementar los filtros pasa-todo, se incrementa la densidad de reflexiones. Al configurar retardos no correlacionados, se disminuye la periodicidad en la reverberación, algo deseado. Por otro lado, al incrementar el factor de ganancia de los filtros peine, se prolonga el decaimiento en tiempo, mientras que al incrementar la ganancia de los pasa-todo, se logra una reverberación más difusa. Por último, la elección de la frecuencia de corte permite generar reverberaciones simulando una sala con más o menos absorción en alta frecuencia.

Para futuros trabajos queda implementar la versión completa del reverberador de Moorer [7], en la cual de-

be rediseñarse el bloque de filtro peine para incorporar los filtros pasa bajo en la rama de retroalimentación, por un lado, y por el otro, incorporar el Multitap Delay como primer bloque para emular las reflexiones tempranas. Esto se logra con filtros peine FIR en paralelo.

## REFERENCIAS

- [1] B. F. Logan M. R. Schroeder. «"Colorless" Artificial Reverberation». En: *IRE Transactions on Audio* (1961).
- [2] Editor Udo Zolzer. *DAFX, Digital Audio Effects*. 2002.
- [3] J. Reiss y A. McPherson. *Audio Effects - Theory, Implementation and Application*. 2015.
- [4] Paul Wittschen. «Schroeder Reverberator». En: ().
- [5] Jian Sun. «Schroeders Reverberation: The Earliest Digital Solution of Sound Reverberation». En: (2005).
- [6] B. S. Kirei I. Dornean M. Topa. «Digital Implementation of Artificial Reverberation Algorithms». En: *Acta Technica Napocencis, Vol. 49, No. 4* (2008).
- [7] J. A. Moorer. «About This Reverberation Business». En: *Computer Music Journal, Vol.3, No. 2 pp. 13-28* (1979).