

PROYECTO INTEGRADOR GRUPO

1

Diseño e Implementación de un Banco de Filtros Digitales



Alumnos: González, Gabriel Isaías

Ocón, Santiago Luis

Vale, Fernando Alexis

Año de cursado: 2019

Asignatura: Procesamiento Digital de Señales



RESUMEN

En el presente proyecto se realizó el diseño e implementación de un banco de filtros digitales que actuará en el rango de las frecuencias de 100Hz a 1000Hz. Su principal finalidad es la de separar los distintos rangos de frecuencias considerando:

- **Rango de Frecuencias 1:** 100 [Hz] – 250 [Hz]
- **Rango de Frecuencias 2:** 250 [Hz] – 400 [Hz]
- **Rango de Frecuencias 3:** 400 [Hz] – 550 [Hz]
- **Rango de Frecuencias 4:** 550 [Hz] – 700 [Hz]
- **Rango de Frecuencias 5:** 700 [Hz] – 850 [Hz]
- **Rango de Frecuencias 6:** 850 [Hz] – 1000 [Hz]

Se procederá a realizar el diseño analítico del filtro prototipo, para luego realizar el análisis del mismo haciendo uso de herramientas computacionales (Matlab, Simulink) y obtener así distintas gráficas y respuestas del mismo. Una vez verificado el correcto diseño, implementaremos el banco de filtros digitales para las frecuencias detalladas anteriormente y verificaremos el diseño por medio de una simulación en Simulink, visualizando la salida del sistema ante una señal de excitación sinusoidal en el rango de frecuencias permitidas por el diseño.

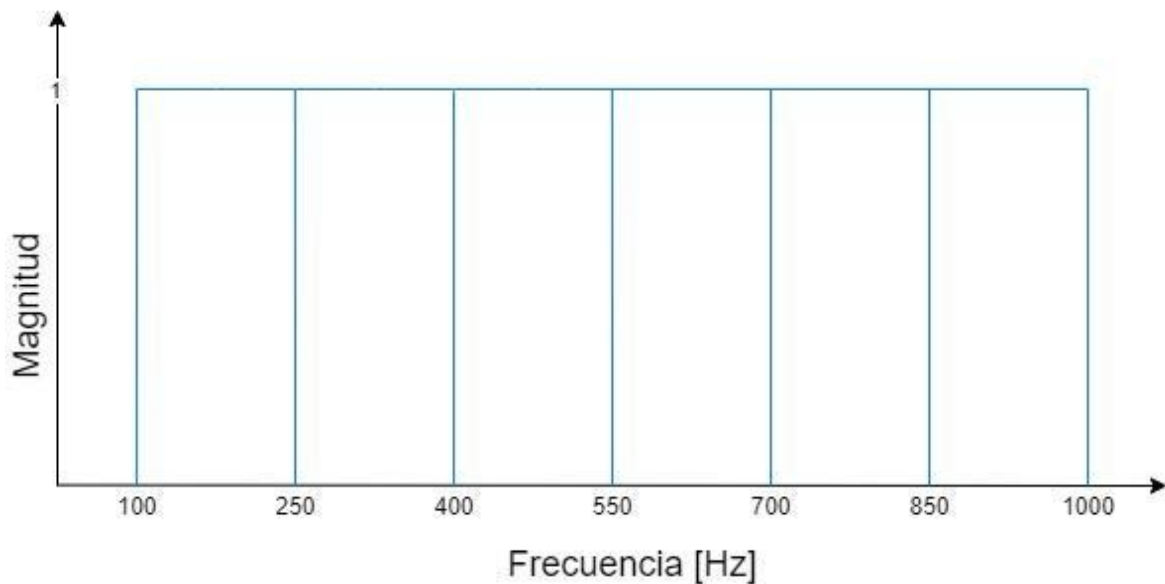
DESARROLLO DEL TEMA

Como primera medida a la hora de realizar el diseño de un banco de filtros digitales, debemos conocer las especificaciones de los filtros a diseñar de manera que cumplan con los requerimientos.

En nuestro caso:

- El rango de frecuencias total debe comprender a todas las bandas completas.
- Los anchos de banda deben coincidir con los puntos de media potencia de cada filtro.
- La última banda debe ser calculada considerando que la pendiente de atenuación quede comprendida dentro del rango total de frecuencias.
- Cada filtro debe tener una transferencia unitaria en su frecuencia central.
- Cada banda debe ser simétrica respecto a la frecuencia central.
- El orden del filtro debe ser tal que no produzca un solapamiento muy excesivo.

Idealmente nuestro banco de filtros digitales deberá tener la siguiente respuesta en frecuencia:



Si bien la respuesta anterior es ideal, trataremos de realizar un diseño correcto para obtener una respuesta lo más similar posible a ésta.

FILTRO PROTOTIPO

A la hora de diseñar cualquier filtro digital, partiremos de un filtro prototipo pasabajos digital (el cual será simplificado en el siguiente apartado), para luego por medio de transformaciones de frecuencias, obtener nuestros filtros pasabanda digitales que cumplan con los requerimientos dados.

Para el diseño del filtro prototipo se tomó como frecuencia de corte una de las frecuencias de corte del filtro de frecuencias medias, si bien puede tomar cualquier valor para la misma, decidimos adoptar este valor. Tomamos como $f_{c \text{ prototipo}} = 550$ [Hz] mientras que adoptamos una atenuación de 20 [dB] para una frecuencia del 10% mayor a la frecuencia de corte, es decir $f_{\text{at } 20[\text{dB}]} = 605$ [Hz].

Como último paso antes de diseñar el filtro, observamos que la máxima frecuencia a filtrar es de 1 [kHz], sumada a una pequeña franja de frecuencias superiores dada por la pendiente de atenuación. Por ello adoptamos $f_{\text{max}} = 1,15$ [kHz]. Sabiendo que, de acuerdo al criterio de Nyquist, para tener un muestreo correcto de la señal y evitar cualquier pérdida de información, la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo el doble de la f_{max} , por ello adoptamos $f_s = 5$ [kHz]. Con todos estos datos calcularemos el orden del filtro necesario, para luego verificar el mismo por medio de Matlab.

$$\frac{\omega_{\text{analogica}} * T}{2} = tg\left(\frac{\omega_{\text{digital}} * T}{2}\right)$$

$$\omega_{analogica} = \frac{2}{T} * tg\left(\frac{\omega_{digital} * T}{2}\right) = 2 * 5 [kHz] * tg\left(\frac{2 * \pi * 550 [Hz]}{2 * 5 [kHz]}\right) = 3,6 [krad/s]$$

$$\omega_{atenuación} = \frac{2}{T} * tg\left(\frac{\omega_{digital} * T}{2}\right) = 2 * 5 [kHz] * tg\left(\frac{2 * \pi * 605 [kHz]}{2 * 5 [kHz]}\right) = 3,995 [krad/s]$$

Luego:

$$n = \frac{1}{2} * \frac{\log\log\left(10^{\frac{At}{10}} - 1\right)}{\log\log\left(\frac{\omega_{atenuación}}{\omega_{corte}}\right)} = \frac{1}{2} * \frac{\log\log\left(10^2 - 1\right)}{\log\log\left(\frac{3,995k}{3,6k}\right)} = 23$$

Dado que un filtro de orden 23 se torna complicado de calcular y manejar, sumado a que al momento de realizar la transformación para obtener el filtro pasabanda final, el orden se duplicará. Por lo tanto, optamos por utilizar la herramienta fdatool de Matlab para determinar el orden mínimo del filtro pasabanda para cumplir con las siguientes especificaciones considerando el filtro más exigente del sistema:

The screenshot shows the MATLAB fdatool interface with the following settings:

- Response Type:** Bandpass (selected)
- Filter Order:** Minimum order (selected)
- Options:** Match exactly: stopband (selected)
- Frequency Specifications:**
 - Units: Hz
 - Fs: 2500
 - Fstop1: 630
 - Fpass1: 700
 - Fpass2: 850
 - Fstop2: 920
- Magnitude Specifications:**
 - Units: dB
 - Astop1: 20
 - Apass: 3
 - Astop2: 20
- Design Method:** IIR Butterworth (selected)

A partir de estos datos, fdatool nos entrega un filtro pasabanda de orden mínimo igual a 8.

1.Desarrollar analíticamente el procedimiento de diseño del filtro prototipo, graficar su respuesta en frecuencia. Graficar la respuesta en frecuencia y verificar las frecuencias de corte y atenuación.

FILTRO PROTOTIPO SIMPLIFICADO PARA EL ANÁLISIS:

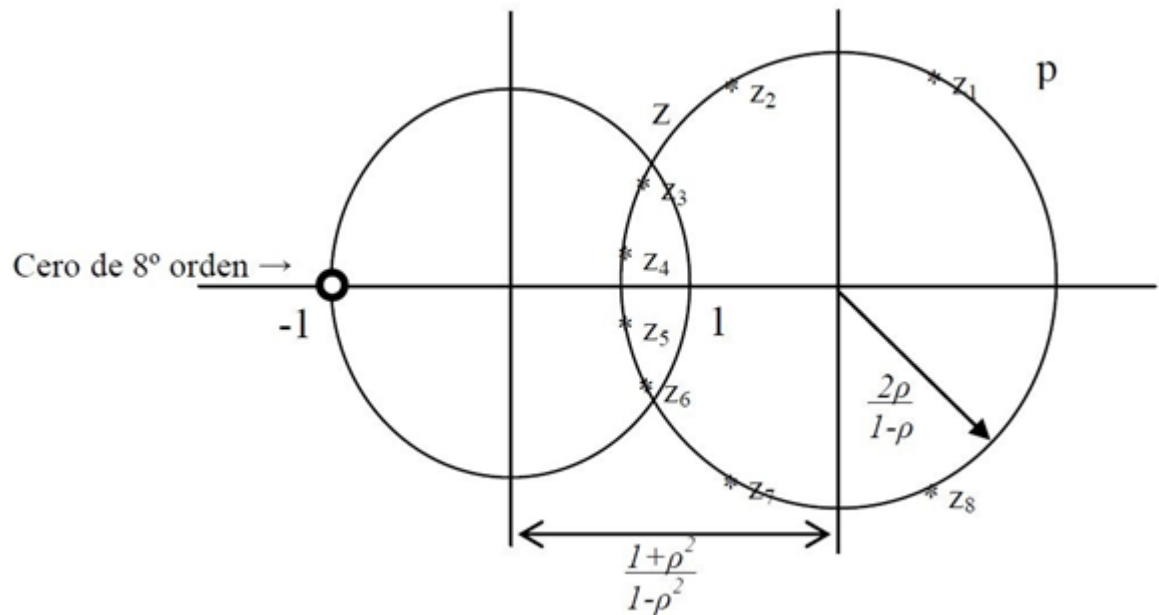
Para desarrollar analíticamente cada uno de los ítems detallados en el enunciado de este proyecto supondremos un filtro prototipo pasabajos de segundo orden, dado que un filtro prototipo de orden 6 sería demasiado engorroso a la hora de realizar los cálculos necesarios. Las características de nuestro filtro prototipo serán las siguientes:

Aclaración: Por especificaciones dadas en el enunciado, se desarrollará un filtro pasabajos tipo Butterworth, por medio del Método Directo

- $f_{corte} = 550 [Hz]$
- $f_s = 1,9 [kHz]$

- $n = 2$
- $m = 0, 1, 2, 3$

Al tratarse de un filtro Butterworth, los polos se encontrarán espaciados entre sí a lo largo de un círculo conocido como círculo de Butterworth. Además, veremos que la mitad de los polos estarán en el interior del mismo (polos estables), mientras que el resto estarán en el exterior de dicho círculo (polos inestables), por lo tanto, solo consideraremos aquellos polos estables ubicados en el interior del círculo. Por otro lado, obtendremos $2n$ ceros ubicados en $z = -1$. Esto lo podemos observar en la siguiente imagen:



A continuación, buscaremos las posiciones de los polos de la función transferencia del filtro, sabiendo que el mismo posee 2 ceros en $z = -1$.

$$\mu_m = \frac{1 - tg^2\left(\frac{\omega_c^* T}{2}\right)}{1 - 2 * tg\left(\frac{\omega_c^* T}{2}\right) * \cos\left(\frac{2m+1}{2n} * \pi\right) + tg^2\left(\frac{\omega_c^* T}{2}\right)}$$

$$v_m = \frac{2 * tg\left(\frac{\omega_c^* T}{2}\right) * \left(\frac{2m+1}{2n} * \pi\right)}{1 - 2 * tg\left(\frac{\omega_c^* T}{2}\right) * \cos\left(\frac{2m+1}{2n} * \pi\right) + tg^2\left(\frac{\omega_c^* T}{2}\right)}$$

$$\mu_0 = -0,7805; v_0 = 2,1793 \quad \text{En forma polar: } 2,3148 \angle 109,70^\circ$$

$$\mu_1 = -0,1456; v_1 = 0,4067 \quad \text{En forma polar: } 0,4320 \angle 109,70^\circ$$

$$\mu_2 = -0,1456; v_2 = -0,4067 \quad \text{En forma polar: } 0,4320 \angle -109,70^\circ$$

$$\mu_3 = -1,2394; v_3 = -2,1793 \quad \text{En forma polar: } 2,3148 \angle -109,70^\circ$$

Luego la función transferencia del filtro será la siguiente:

$$Z_1 * Z_2 = 0,1866$$

$$Z_1 + Z_2 = -0,2912$$

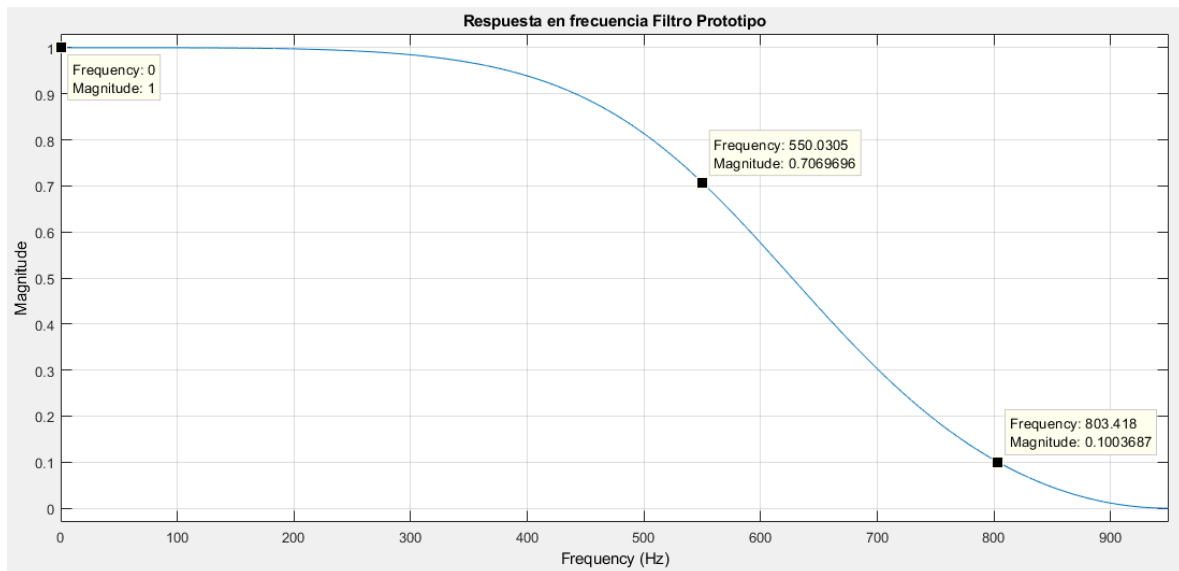
$$H(z) = \frac{(z+1)^2}{z^2 - z^*(Z_1 + Z_2) + Z_1 * Z_2} = \frac{z^2 + 2*z + 1}{z^2 + 0,2912*z + 0,1866} = \frac{1 + 2*z^{-1} + z^{-2}}{1 + 0,2912*z^{-1} + 0,1866*z^{-2}}$$

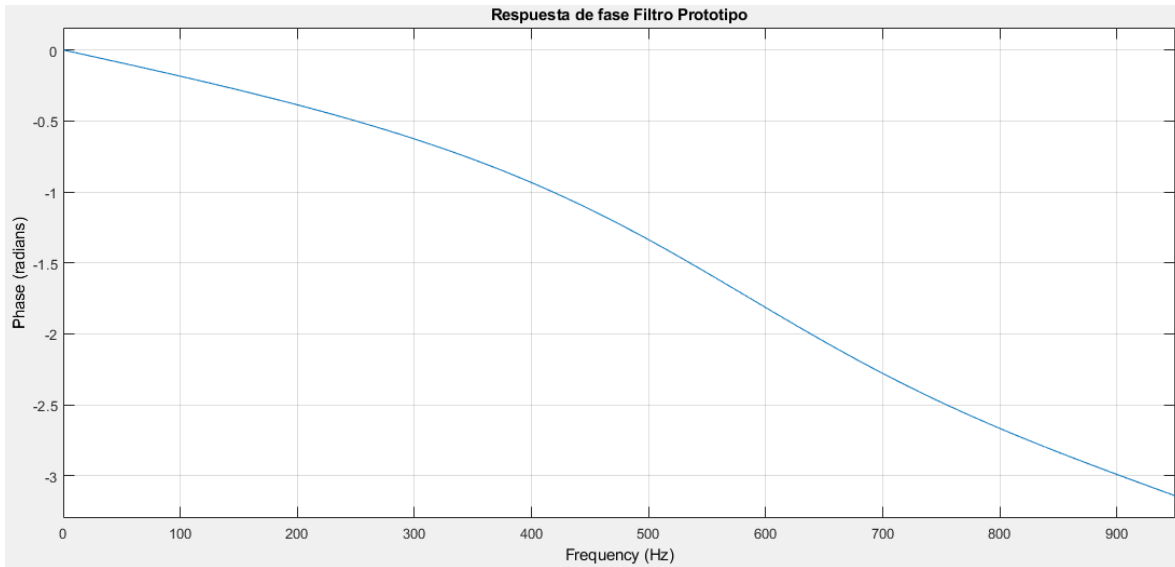
Además:

$$\omega_{analogica} = \frac{2}{T} * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_{digital} * T}{2}\right) = 2 * 1,9 [kHz] * \operatorname{tg}\left(\frac{2 * \pi * 550 [Hz]}{2 * 1,9 [kHz]}\right) = 4,882 [krad/s]$$

$$At_{dB} = 10 * \log\left(1 + \left(\frac{\omega_{analogica}}{\omega_{atenuación}}\right)^{2n}\right)$$

Verificaremos lo anterior a través de una simulación en Matlab:





Observamos como la frecuencia de corte coincide con el punto de media potencia (ganancia de 0,707), al igual que la frecuencia de atenuación de 20 [dB] (equivalentes a una ganancia de 0,1).

Por otro lado, al tratarse de un filtro IIR (Respuesta Infinita al Impulso) la respuesta de fase del mismo no es lineal, sino que decrece a medida que aumenta la frecuencia.

2. Aplicar la transformación espectral adecuada para obtener la función transferencia del filtro para la banda de frecuencias medias. Indicar su descomposición en polos y ceros. Graficar en el plano z^{-1} .

FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIAS MEDIAS

Dada la función transferencia de pulsos $G(z^{-1})$ de un filtro digital pasa bajos prototipo de frecuencia angular de corte β , la función transferencia de un filtro digital pasa banda que tenga el mismo tipo de característica de amplitud que $G(z^{-1})$, frecuencia central ω_0 , y frecuencias de corte superior e inferior ω_2 y ω_1 , se obtiene sustituyendo z^{-1} de $G(z^{-1})$ por la función unitaria:

$$z^{-1} = - \frac{\frac{k-1}{k+1} - 2\alpha \frac{k}{k+1} z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2\alpha \frac{k}{k+1} z^{-1} + \frac{k-1}{k+1} z^{-2}}$$

Donde:

$$\beta = \omega_c ; \alpha = \frac{\cos(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} * T)}{\cos(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} * T)} ; k = \cotg\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} * T\right) * \tg\left(\frac{\beta * T}{2}\right)$$

El filtro pasabanda a diseñar tendrá las siguientes especificaciones:

- $f_s = 1,900$ [kHz]
- $f_1 = 400$ [Hz]
- $f_2 = 550$ [Hz]
- $f_0 = 475$ [Hz]
- $\beta = 2 * \pi * 550$ [Hz] = 3,456 [kHz]

$$\alpha = \frac{\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} * T\right)}{\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} * T\right)} = 0$$

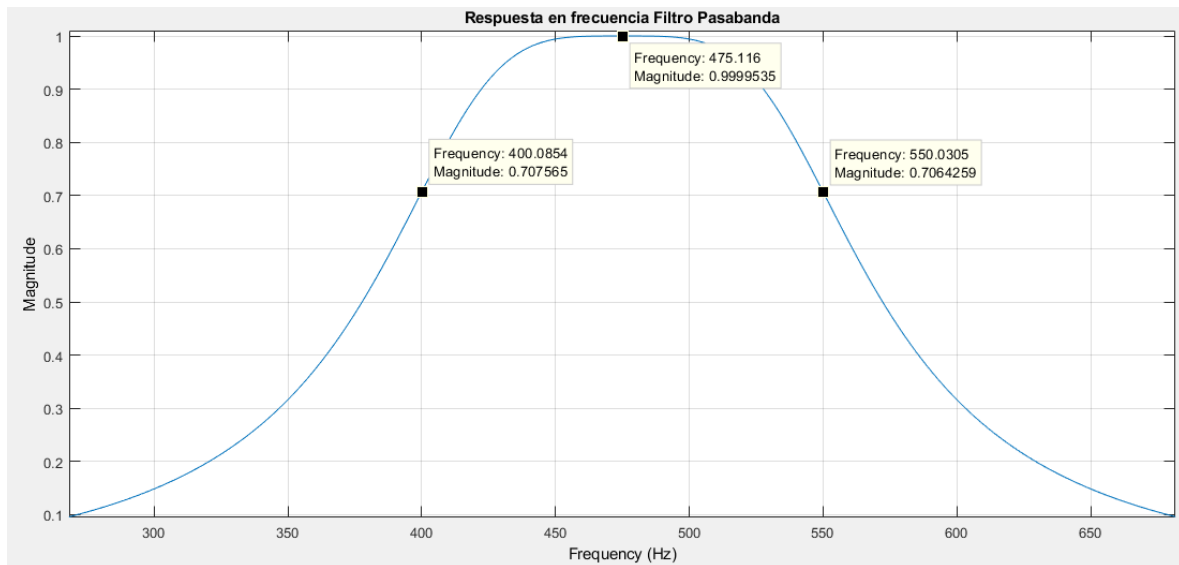
$$k = \cot g\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} * T\right) * \operatorname{tg}\left(\frac{\beta * T}{2}\right) = 5,0735$$

$$z^{-1} = -\frac{\frac{k-1}{k+1} - 2 * \alpha * \frac{k}{k+1} * z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2 * \alpha * \frac{k}{k+1} * z^{-1} + \frac{k-1}{k+1} * z^{-2}} = -\frac{0,6701 + z^{-2}}{1 + 0,6701 * z^{-2}}$$

$$z^{-2} = \frac{0,4490 + 1,3402 * z^{-2} + z^{-4}}{1 + 1,3402 * z^{-2} + 0,4490 * z^{-4}}$$

$$H(z) = \frac{(z+1)^2}{z^2 - z * (z_1 + z_2) + z_1 * z_2} = \frac{z^2 + 2 * z + 1}{z^2 + 0,2912 * z + 0,1866} = \frac{1 + 2 * z^{-1} + z^{-2}}{1 + 0,2912 * z^{-1} + 0,1866 * z^{-2}}$$

$$H(z^{-1}) = 0,1220 * \frac{1 - 2 * z^{-2} + z^{-4}}{1 + 1,3160 * z^{-2} + 0,4963 * z^{-4}}$$



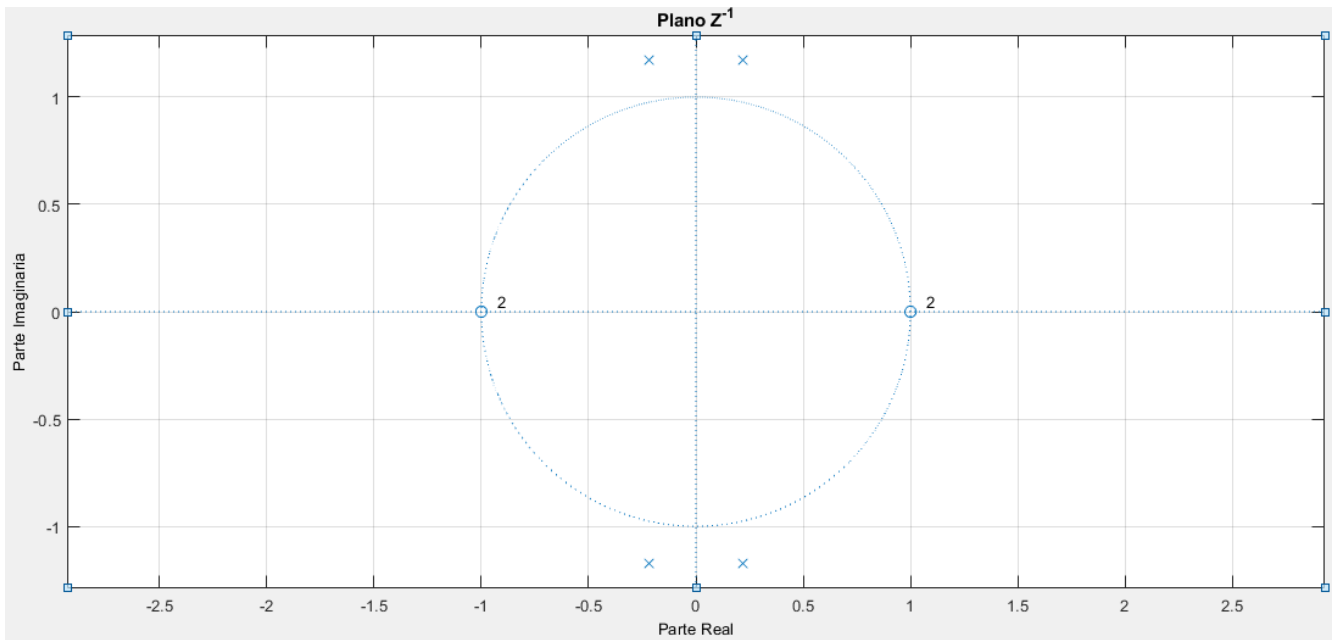
Observamos una correcta transformación del filtro prototipo pasa bajos a un filtro pasabanda para las frecuencias medias, dado que las frecuencias de corte se encuentran ubicadas correctamente.

3. Indicar su descomposición en polos y ceros. Graficar en el plano z^{-1}

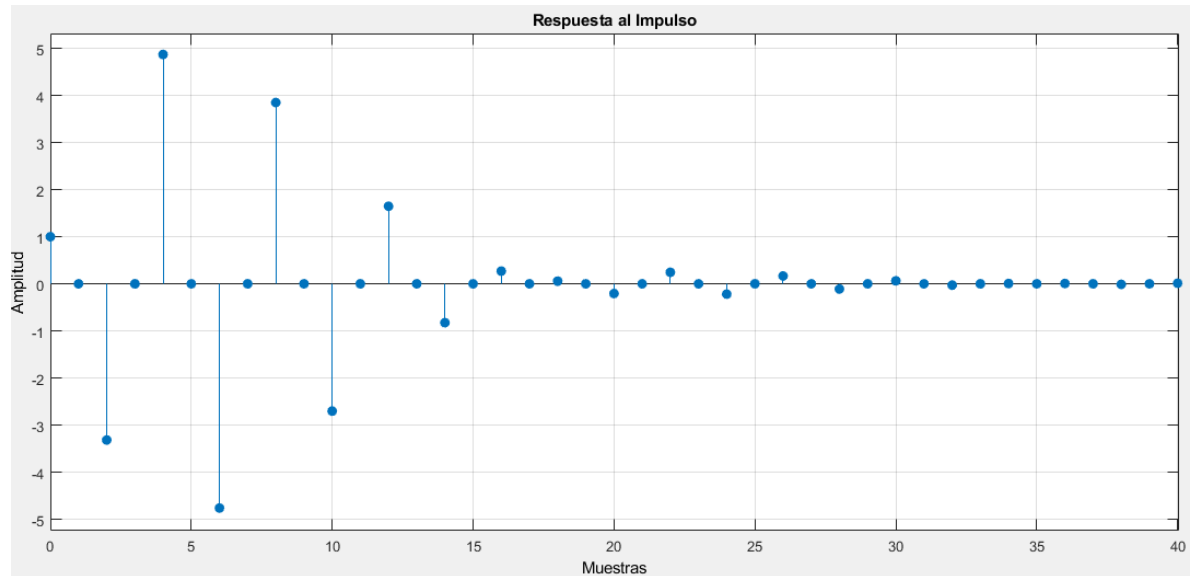
Factoreando la expresión anterior obtenemos su descomposición en polos y ceros:

$$H(z^{-1}) = \frac{(z^{-1}-1)^2 (z^{-1}+1)^2}{(z^{-1}-(0,2164+1,1715j))(z^{-1}-(0,2164-1,1715j))(z^{-1}-(-0,2164+1,1715j))(z^{-1}-(-0,2164-1,1715j))}$$

Con ayuda de Matlab graficamos los polos y ceros hallados anteriormente para obtener la gráfica en el plano z^{-1} solicitada:



4. Encontrar la respuesta temporal del filtro diseñado. Graficar la respuesta al impulso.

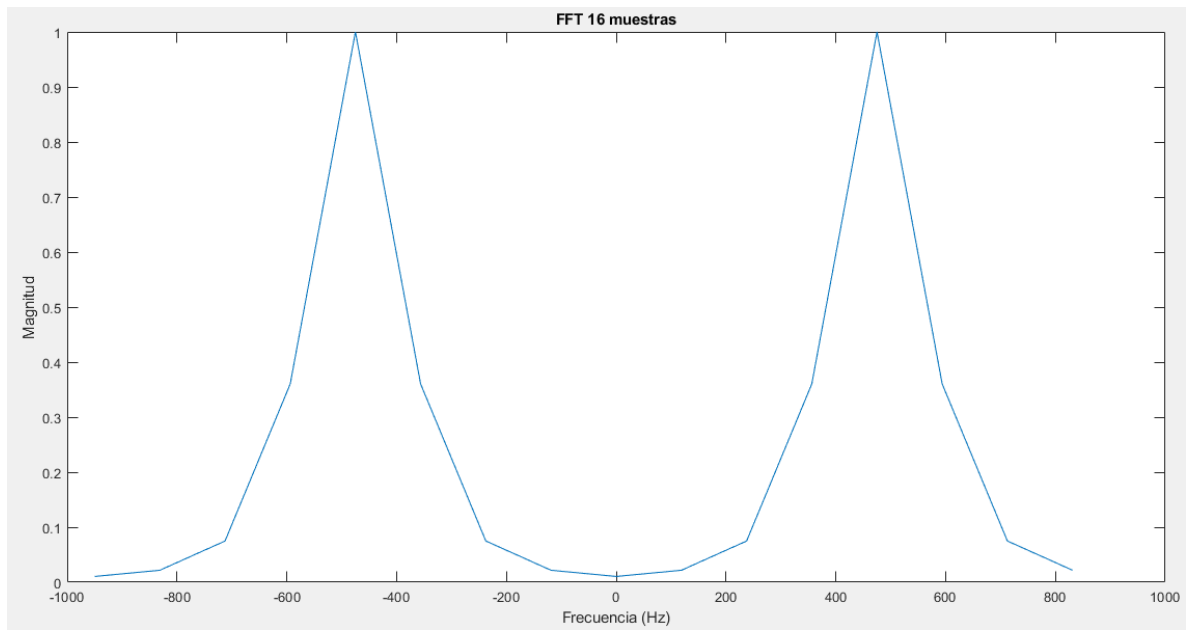


Al ser un filtro IIR, su respuesta al impulso es infinita, pero por otro lado es un filtro estable, lo que da como resultado una respuesta al impulso decreciente alternada (alterna entre valores positivos y negativos como vemos en el gráfico obtenido)

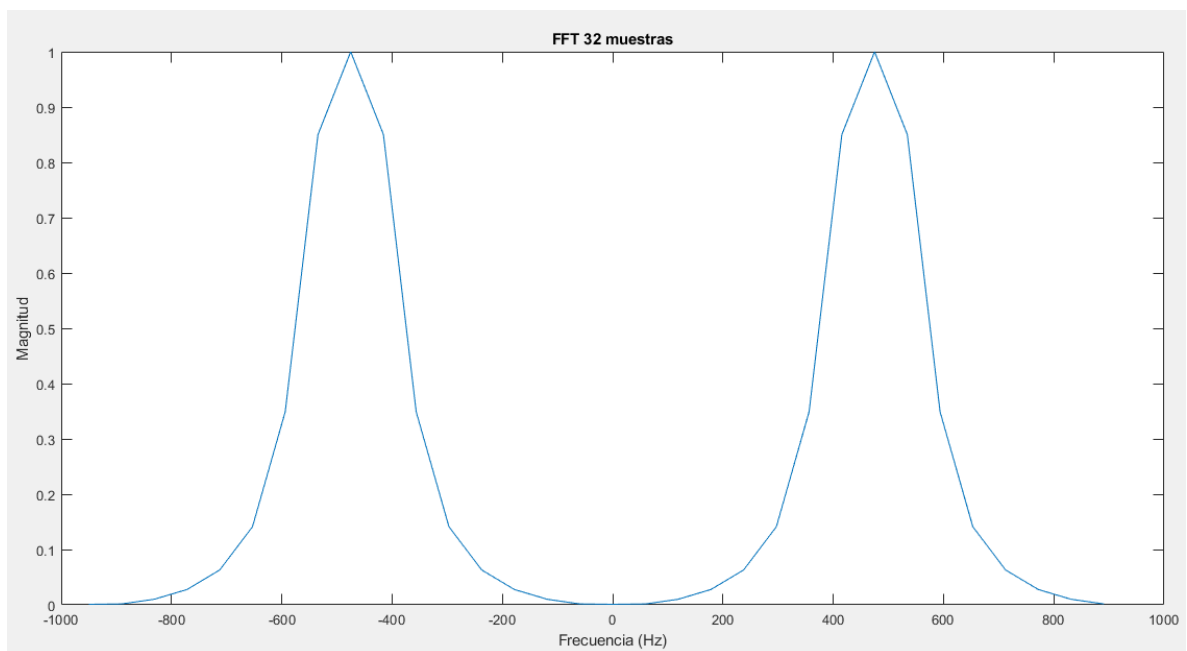
5. Aplicar la FFT (usando la respuesta al impulso), para un número de muestras $N = 16, 32, 64$. Graficar, comparar los resultados y comentar. Comparar con la respuesta en frecuencia.

Para obtener la Transformada Rápida de Fourier usando la respuesta al impulso para distintos números de muestras se utilizó el código anexo en este informe. El mismo nos arrojó los siguientes resultados:

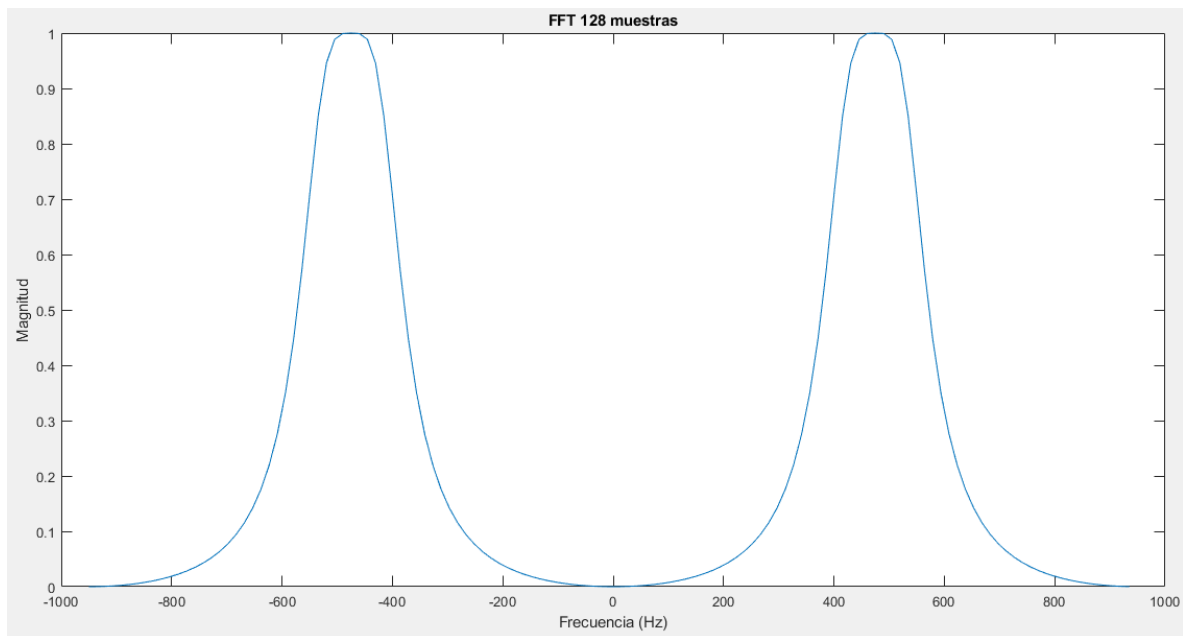
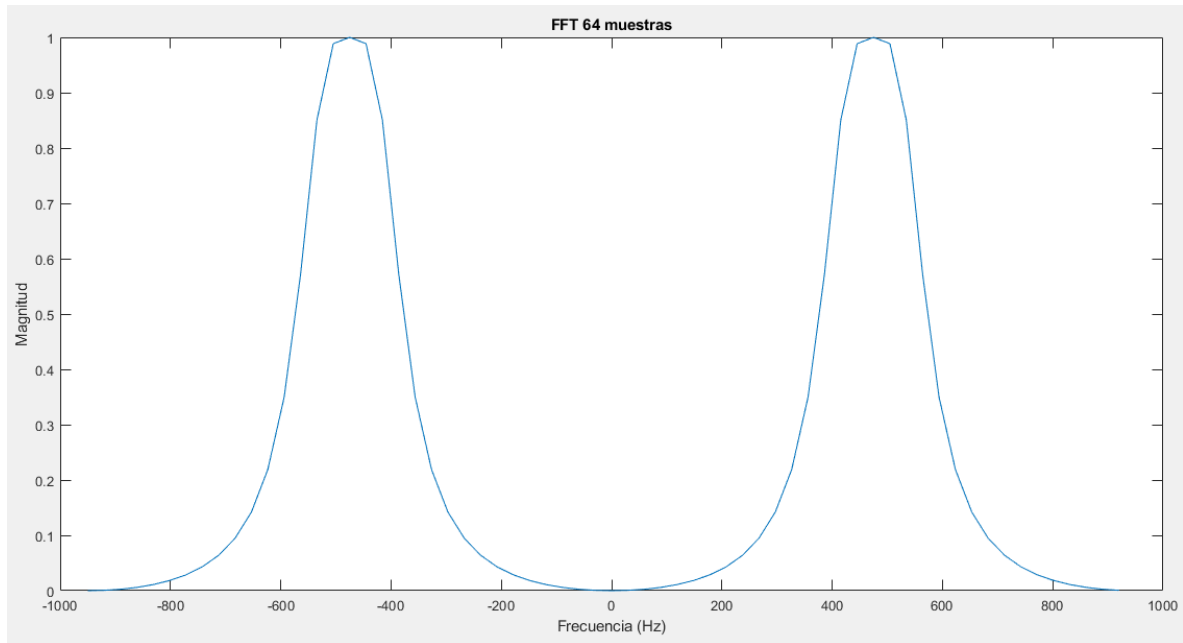
FFT con $N = 16$ muestras



FFT con N = 32 muestras



FFT con N = 64 muestras

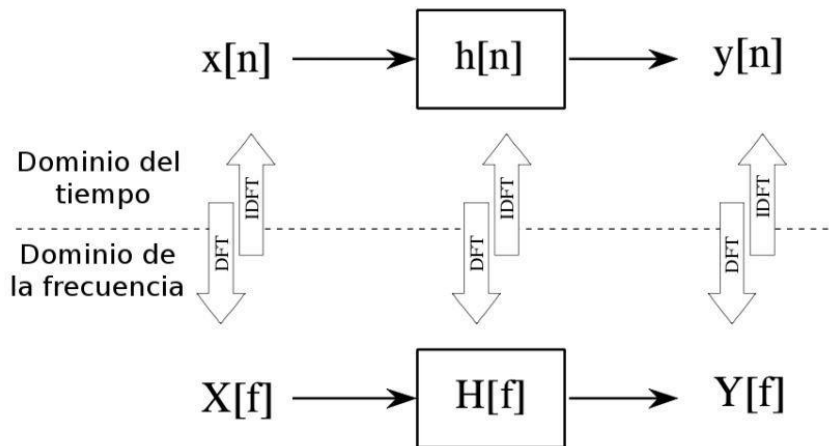


A simple vista se puede observar cómo al aumentar el número de muestras analizadas para realizar la Transformada de Fourier, la exactitud y resolución de la misma aumenta considerablemente debido a que tomamos una mayor cantidad de datos de la señal a analizar. Observamos además como al tomar 64 muestras y 128 muestras, la respuesta es prácticamente la misma. De manera que si se desea realizar una FFT podría optarse por tomar solamente 64 muestras dado que se obtiene una respuesta muy exacta.

Al comparar la respuesta de la FFT con la respuesta en frecuencia de nuestro filtro pasabanda, observamos que ambos resultados coinciden, lo cual es correcto ya que la respuesta

en frecuencia es la Transformada de Fourier de Tiempo Discreto de la respuesta al impulso, y dado que la respuesta al impulso es real (no compleja), la respuesta en frecuencia es simétrica conjugada.

Lo dicho anteriormente sobre la relación entre la respuesta en frecuencia y la Transformada de Fourier podemos verlo en el siguiente diagrama:



Observamos cómo obtener en el dominio del tiempo la respuesta al impulso y luego realizar la Transformada de Fourier es equivalente a pasar todo al dominio de la frecuencia y obtener la respuesta del sistema.

VALIDACIÓN DEL DISEÑO USANDO MATLAB/SIMULINK

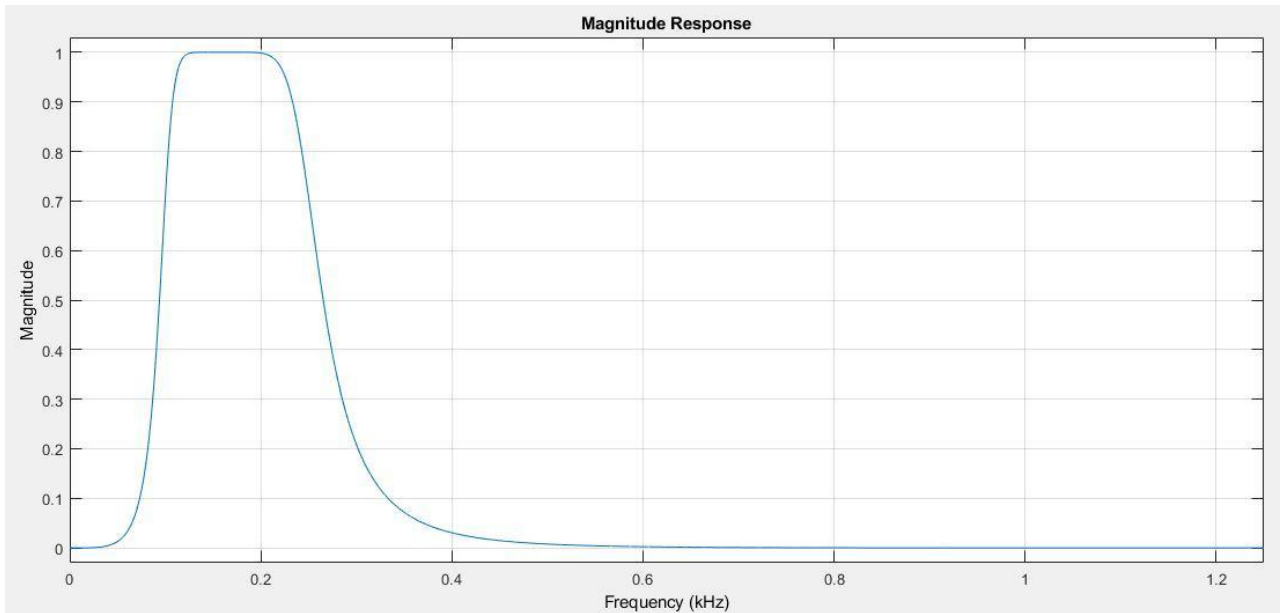
6. Usando el entorno fdatool de Matlab, obtener los filtros correspondientes a cada banda. Para cada filtro: Graficar la respuesta en frecuencia (amplitud y fase), respuesta al impulso, diagrama de polos y ceros, los coeficientes y la realización.

Una vez realizado el análisis analítico del filtro prototipo y su transformación espectral en un filtro pasabanda, utilizaremos el entorno fdatool de Matlab para obtener así los filtros pasabanda definitivos, y con estos armar nuestro banco de filtros digitales.

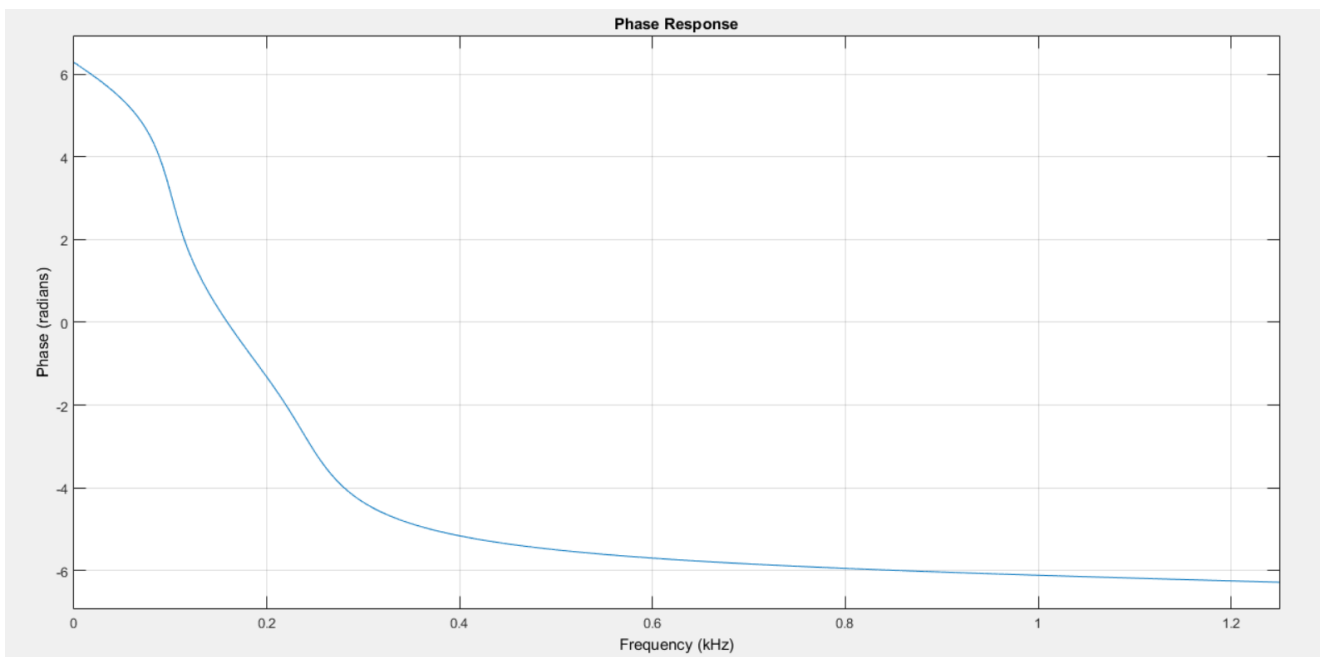
En el entorno fdatool colocaremos como datos las frecuencias de corte deseadas para cada banda), la frecuencia de muestreo ($f_s = 2,5$ [kHz]) y el orden del filtro (8). Una vez realizado esto, Matlab nos da como resultado el filtro diseñado, los cuales se verán a continuación.

FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIA 100-250 Hz

- Respuesta en frecuencia de amplitud:



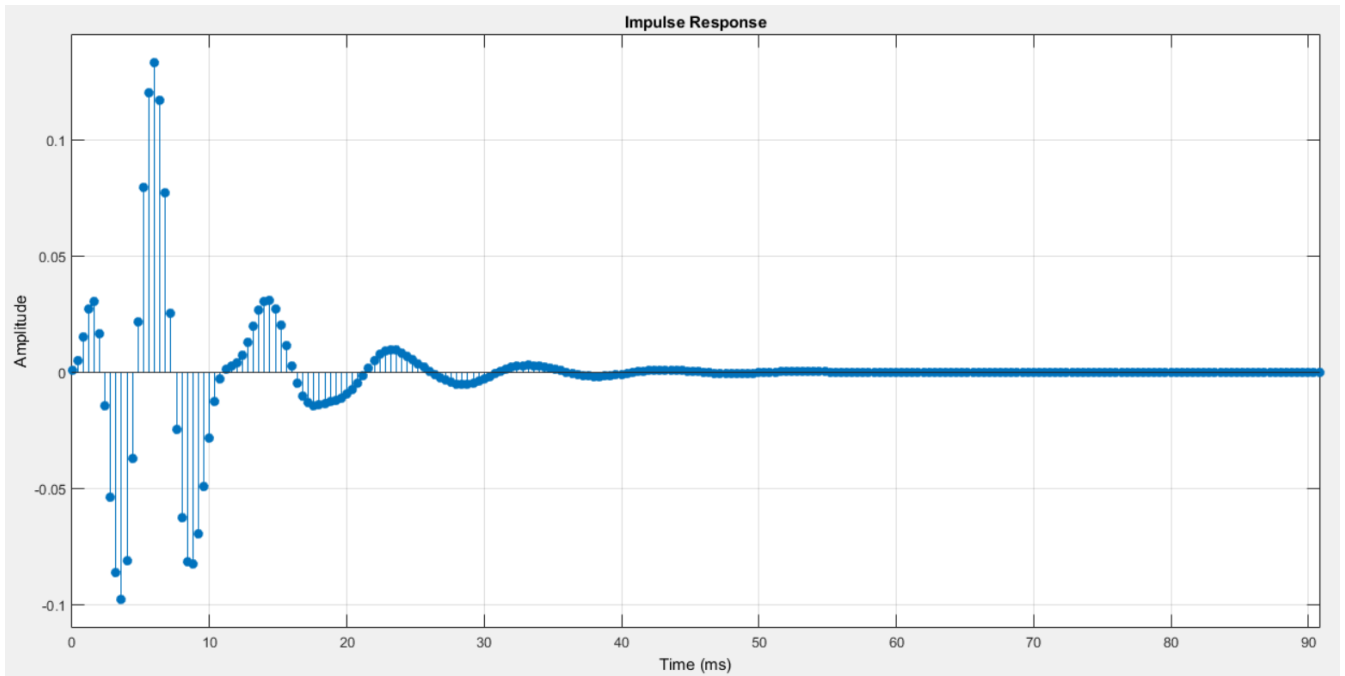
- Respuesta en frecuencia de fase:



Observamos cómo cumple con las especificaciones al poseer sus frecuencias de corte en 100 [Hz] y 250 [Hz] respectivamente, al mismo tiempo que en su frecuencia central la ganancia es unitaria. Además, posee una pendiente de atenuación considerable.

Por otro lado, al ser un filtro IIR observamos que su respuesta de fase es no lineal decreciente con el aumento de la frecuencia.

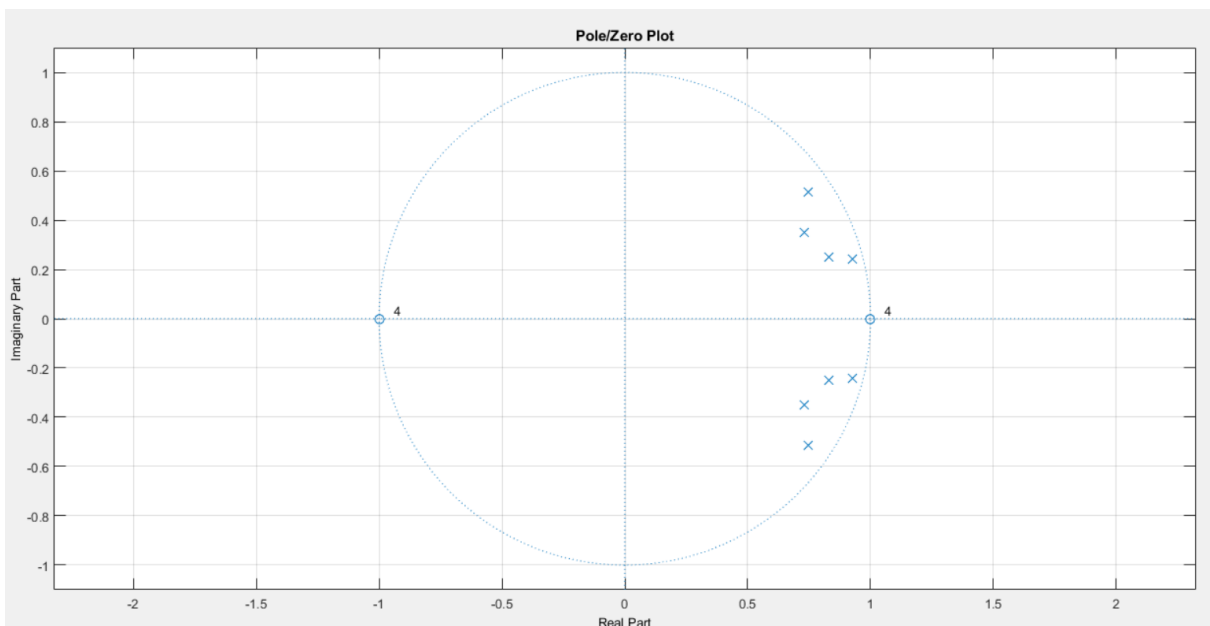
- Respuesta al impulso:



Se puede apreciar como la respuesta no es continua, sino que se trata de una señal discreta compuesta por una serie de pulsos muy juntos entre sí.

Al ser un filtro IIR, su respuesta al impulso es infinita decreciente con el aumento de la frecuencia, viendo que la misma tiende a 0, lo que lo caracteriza como un filtro estable.

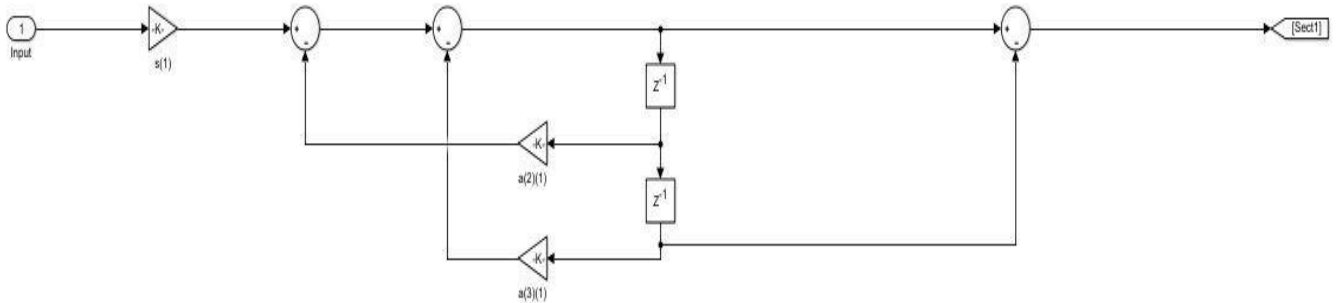
- Diagrama de polos y ceros:



Podemos observar en el diagrama de polos y ceros que todos los polos se encuentran en el interior de círculo de radio unitario, lo que se corresponde con lo dicho anteriormente sobre la estabilidad de este filtro.

- Coeficientes y realización:

Aclaración: la realización de cada uno de los seis filtros está dada por cuatro secciones que tienen la misma configuración y es la siguiente.



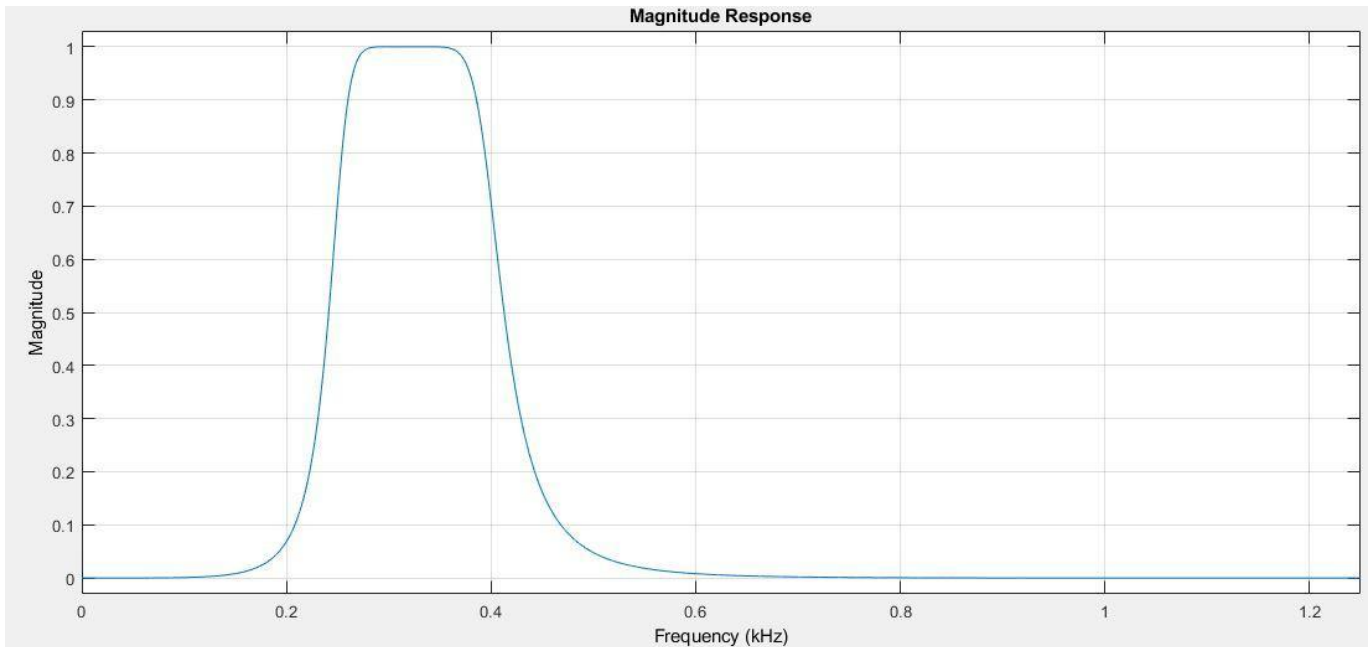
A continuación, se detalla el valor de los coeficientes de cada sección tanto para este filtro como para los restantes.

Filtro 1							
	Ganancia	Numerador			Denominador		
Sección 1	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	-1,4907	0,8216
Sección 2	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	-1,8530	0,9166
Sección 3	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	-1,6588	0,7512
Sección 4	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	-1,4616	0,6555

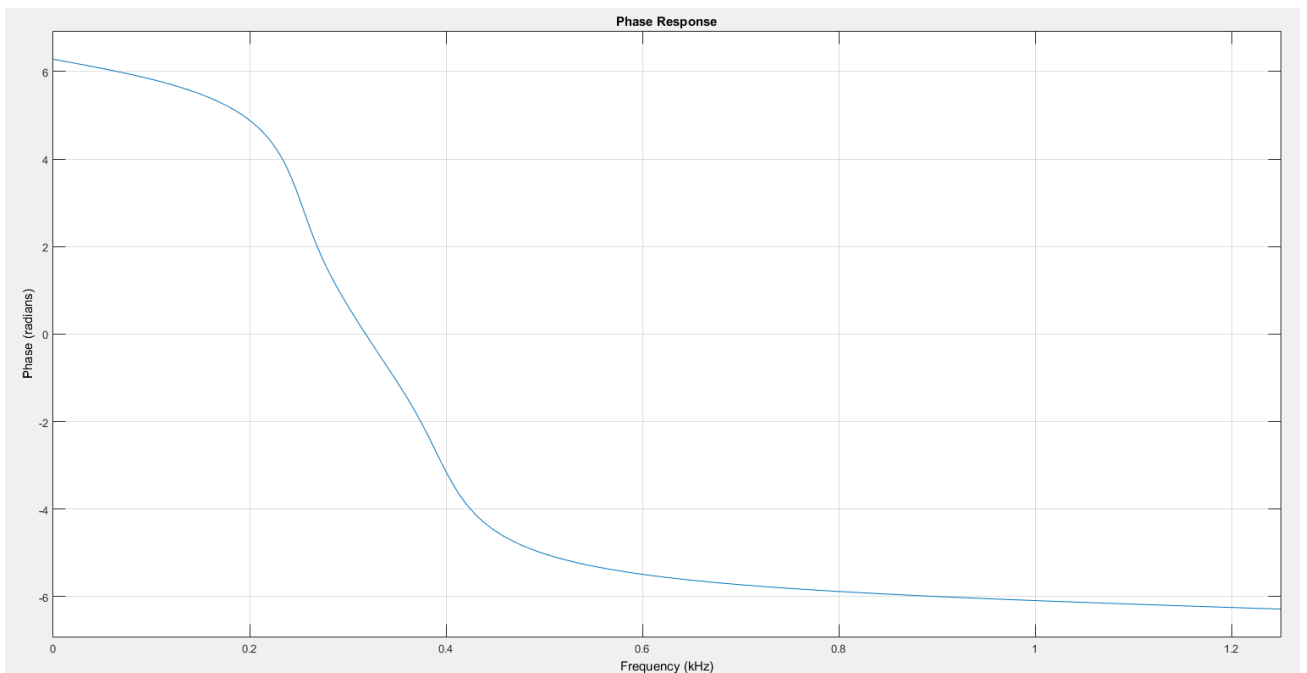


FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIA 250-400 Hz

- Respuesta en frecuencia de Amplitud:

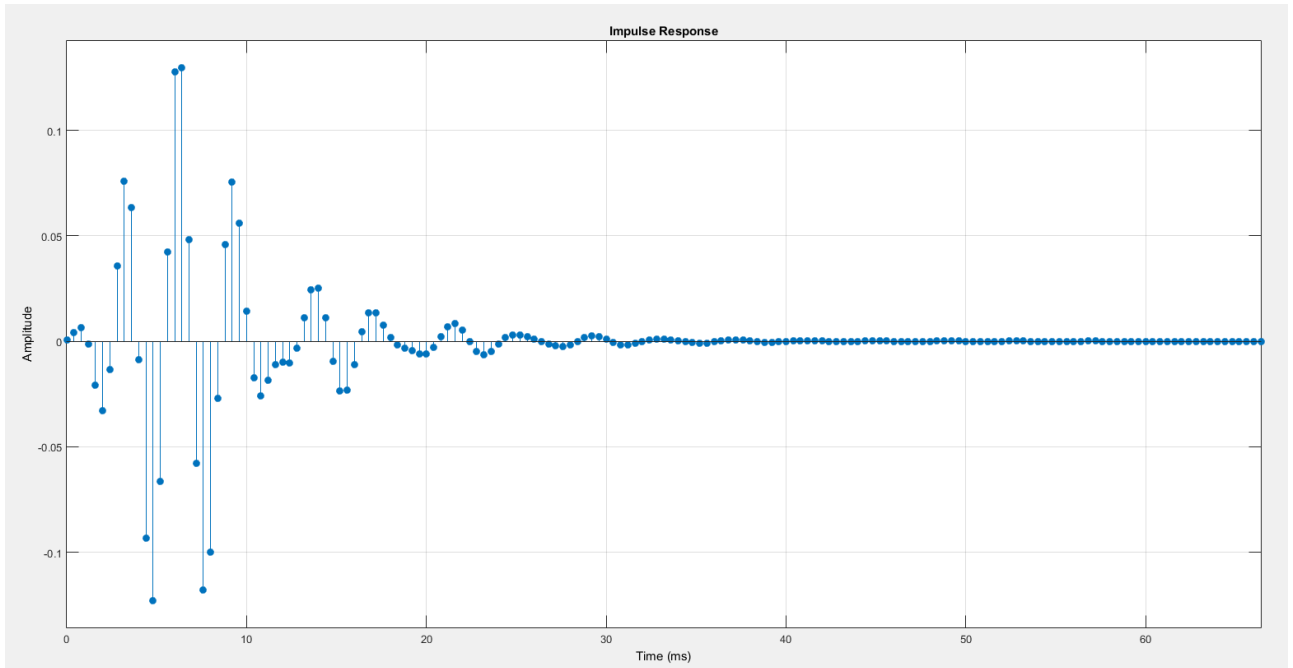


- Respuesta en frecuencia de Fase:



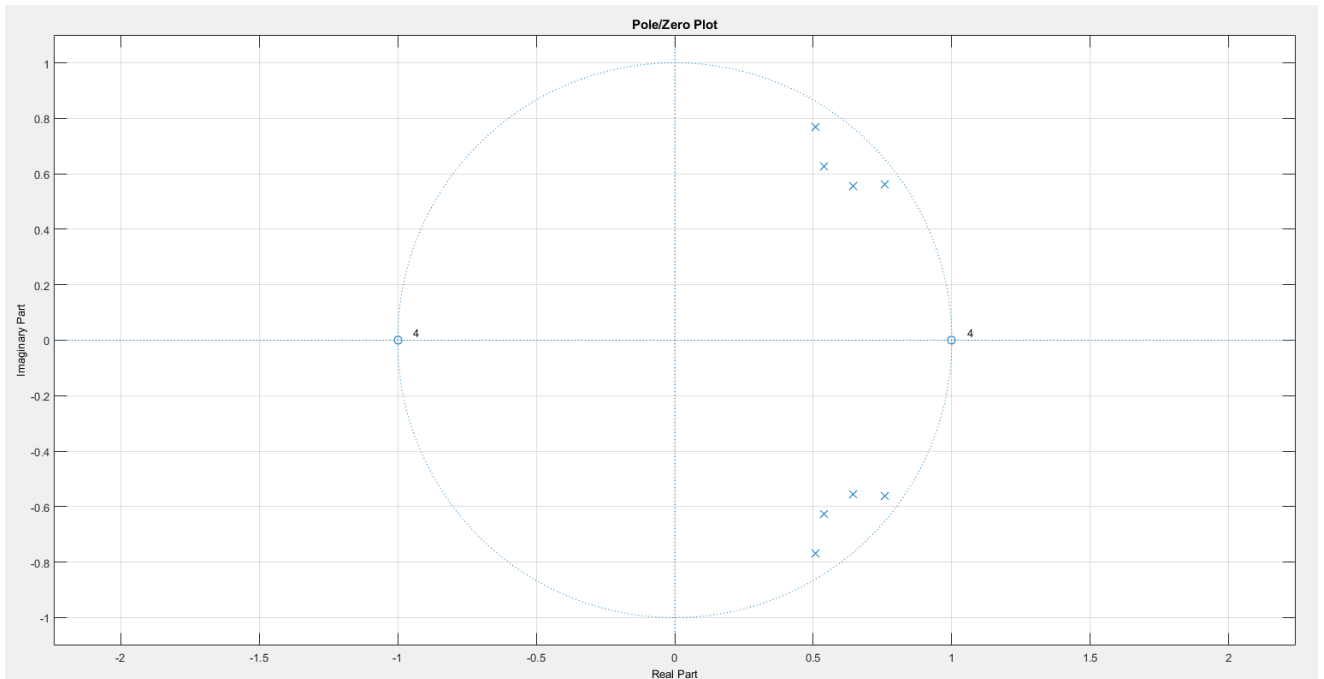
Observamos que las frecuencias de corte se encuentran en los puntos de media potencia, lo que nos asegura el correcto diseño y funcionamiento del filtro. Además, posee una respuesta de fase no lineal decreciente, dado que se trata de un filtro IIR.

- Respuesta al impulso:



Podemos observar una respuesta al impulso decreciente alternada que tiende a 0 lo que nos asegura la estabilidad de nuestro filtro.

- Diagrama de polos y ceros:



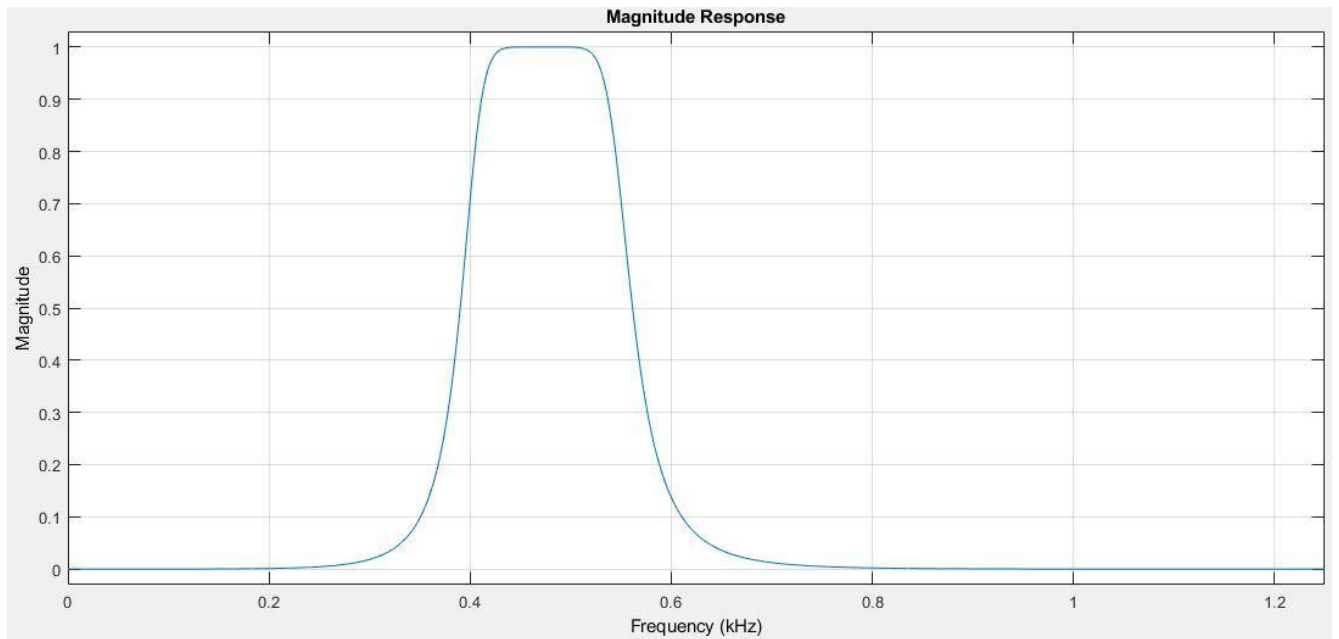
Podemos ver como todos los polos se encuentran en el interior del círculo de radio unitario, lo que confirma la afirmación dada anteriormente sobre la estabilidad del filtro.

- Coeficientes y realización:

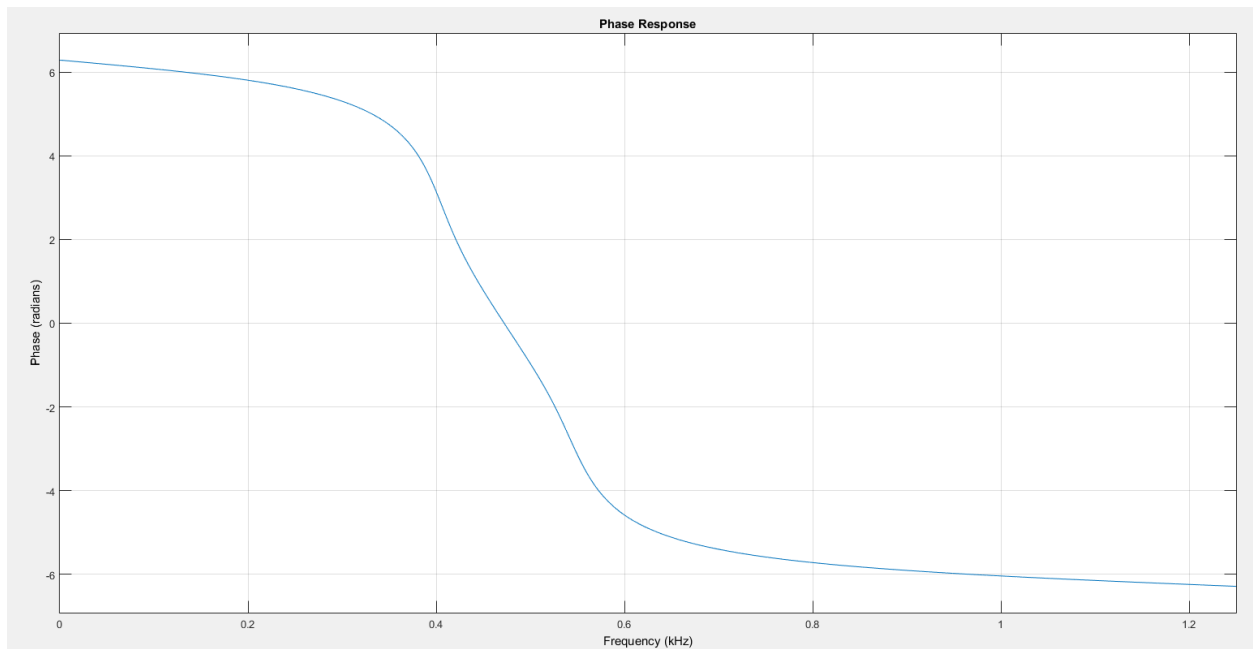
Filtro 2							
	Ganancia	Numerador			Denominador		
Sección 1	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	$-\frac{1,013}{9}$	0,8474
Sección 2	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	$-\frac{1,515}{7}$	0,8887
Sección 3	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	$-\frac{1,285}{1}$	0,7204
Sección 4	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	$-\frac{1,075}{7}$	0,6835

FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIA 400-550 Hz

- Respuesta en frecuencia de Amplitud:

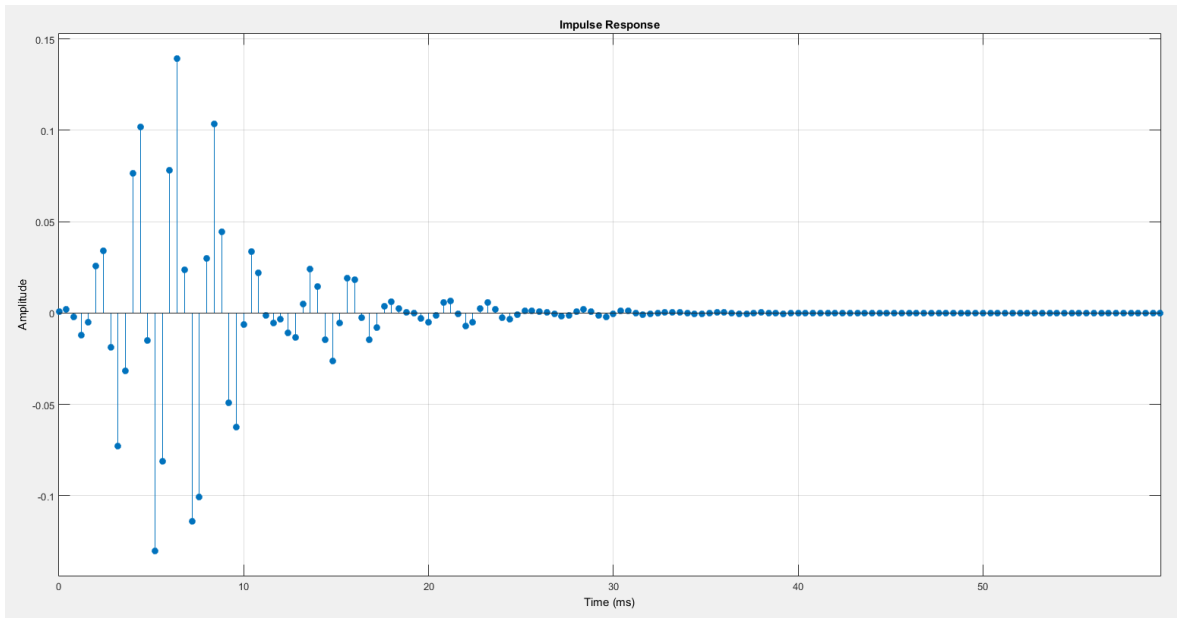


- Respuesta en frecuencia de Fase:



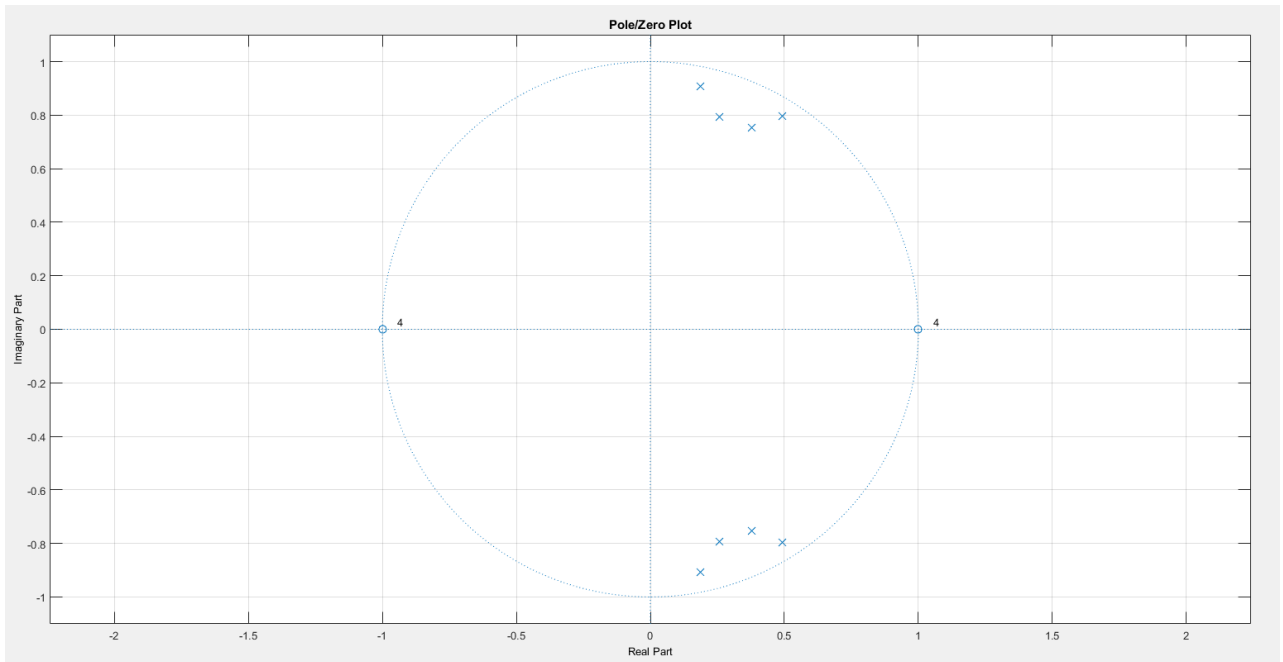
Se observa el correcto funcionamiento del filtro en relación a sus frecuencias de corte superior e inferior, junto con una correcta pendiente de atenuación. Por otro lado, al igual que los filtros anteriores, la respuesta de fase es no lineal decreciente dado al tipo de filtro (IIR), con un desfase nulo en la frecuencia de corte inferior.

- Respuesta al impulso:



Al igual que en los demás filtros, observamos una respuesta decreciente, lo que nos asegura la estabilidad del mismo.

- Diagrama de polos y ceros:

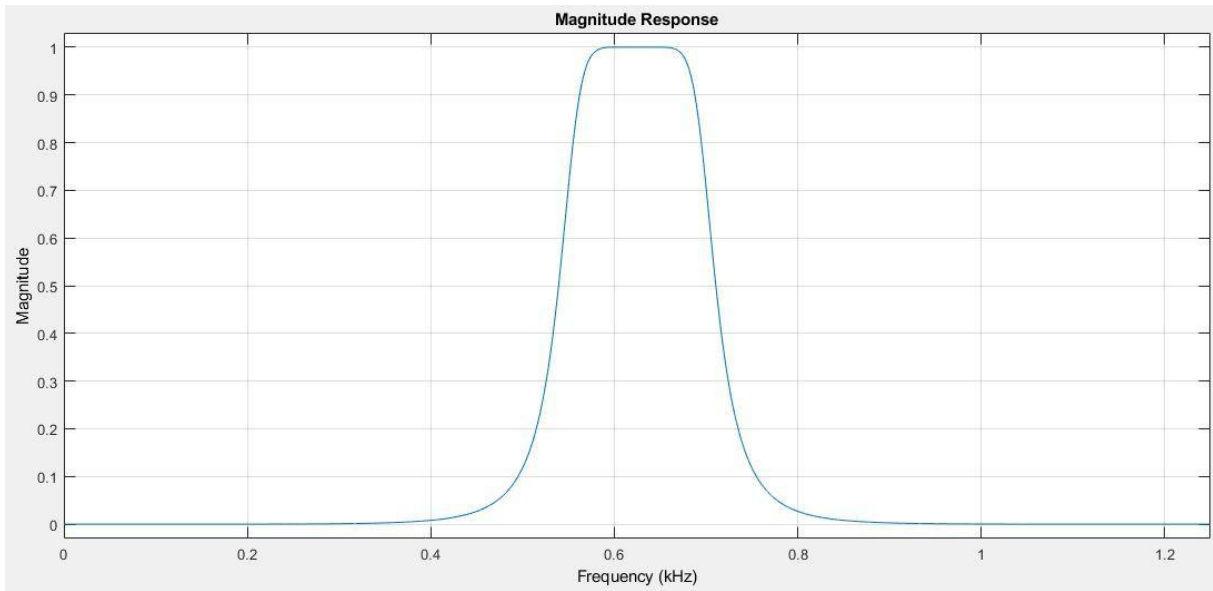


- Coeficientes y realización:

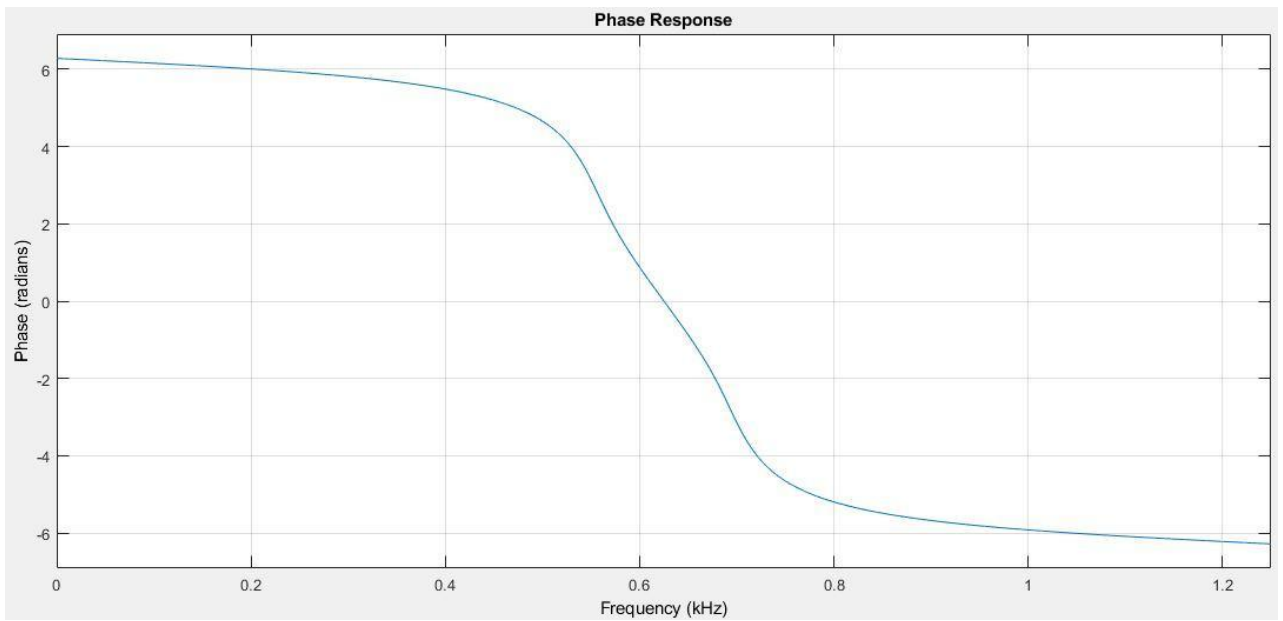
Filtro 3							
	Ganancia	Numerador			Denominador		
Sección 1	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	$-\frac{0,374}{9}$	0,8592
Sección 2	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	$-\frac{0,985}{5}$	0,8765
Sección 3	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	$-\frac{0,754}{6}$	0,7094
Sección 4	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	$-\frac{0,514}{9}$	0,6942

FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIA 550-700 Hz

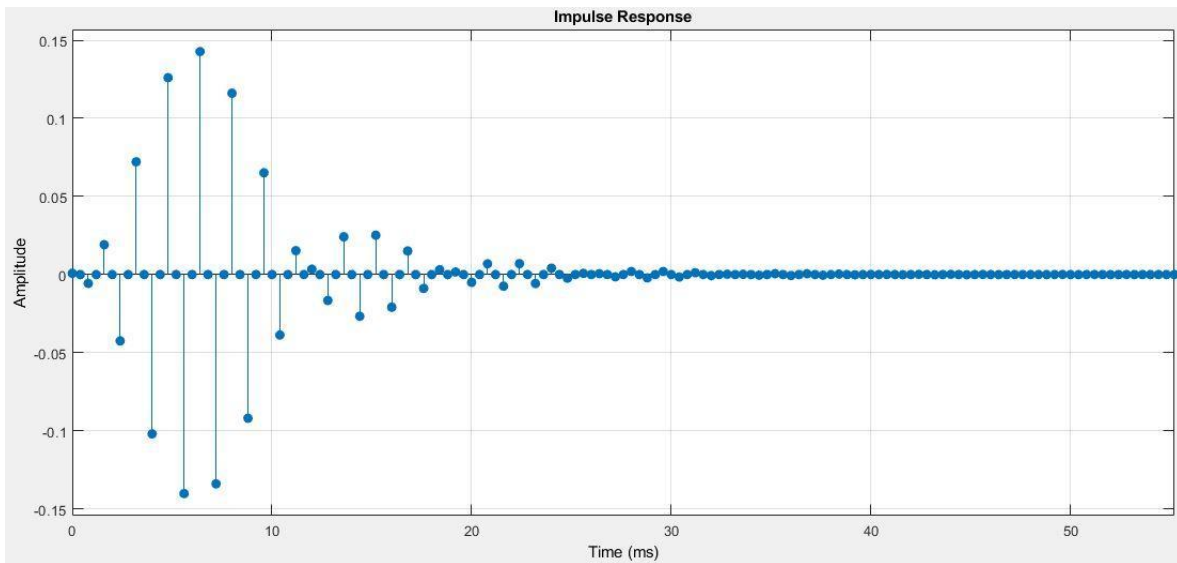
- Respuesta en frecuencia de Amplitud:



- Respuesta en frecuencia de Fase:

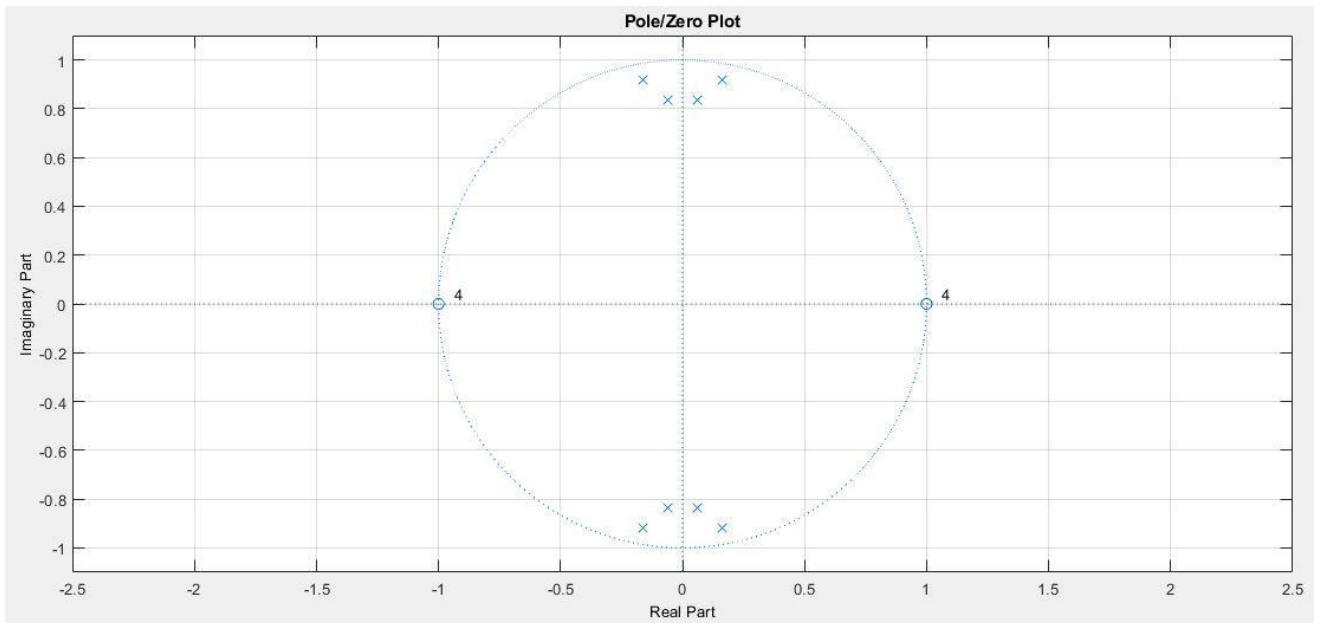


- Respuesta al impulso:



Nuevamente vemos una respuesta decreciente, lo que nos asegura la estabilidad del mismo. Es importante destacar que la respuesta de este filtro es más rápida en relación a los demás.

- Diagrama de polos y ceros:



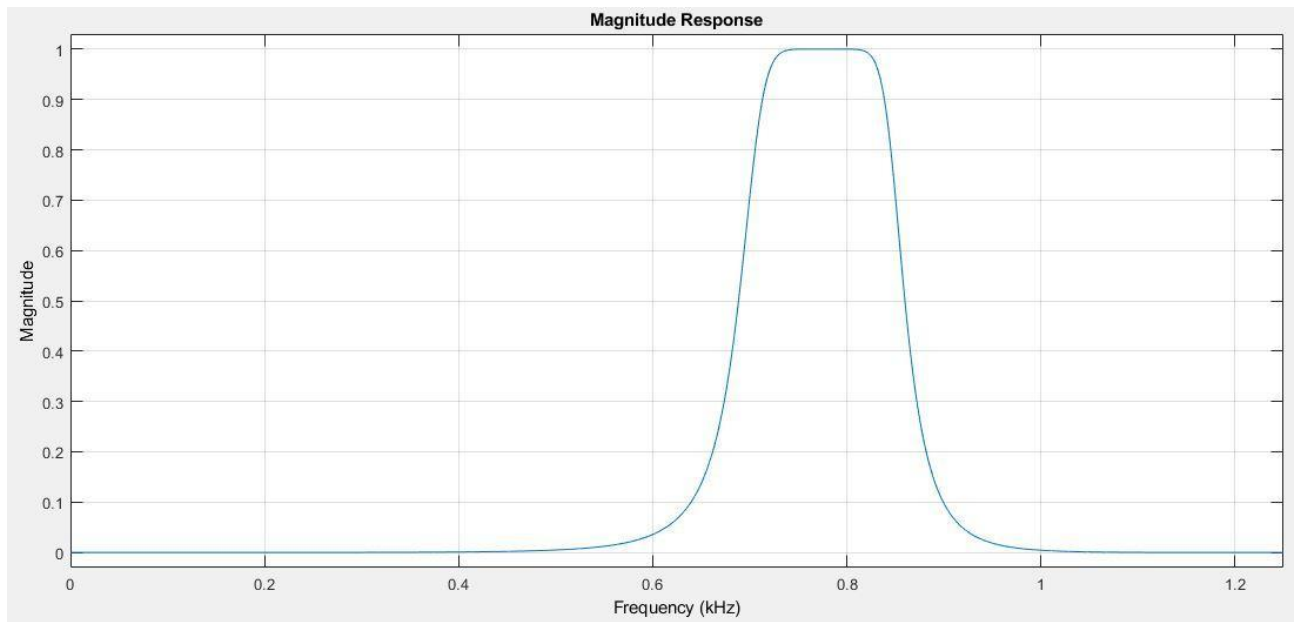
Observamos una mayor cercanía de los polos al eje imaginario, lo que da como resultado la respuesta más rápida al impulso vista anteriormente. Por otro lado, todos los polos se encuentran dentro del círculo de radio unitario, lo que nos asegura la estabilidad del filtro.

- Coeficientes y realización:

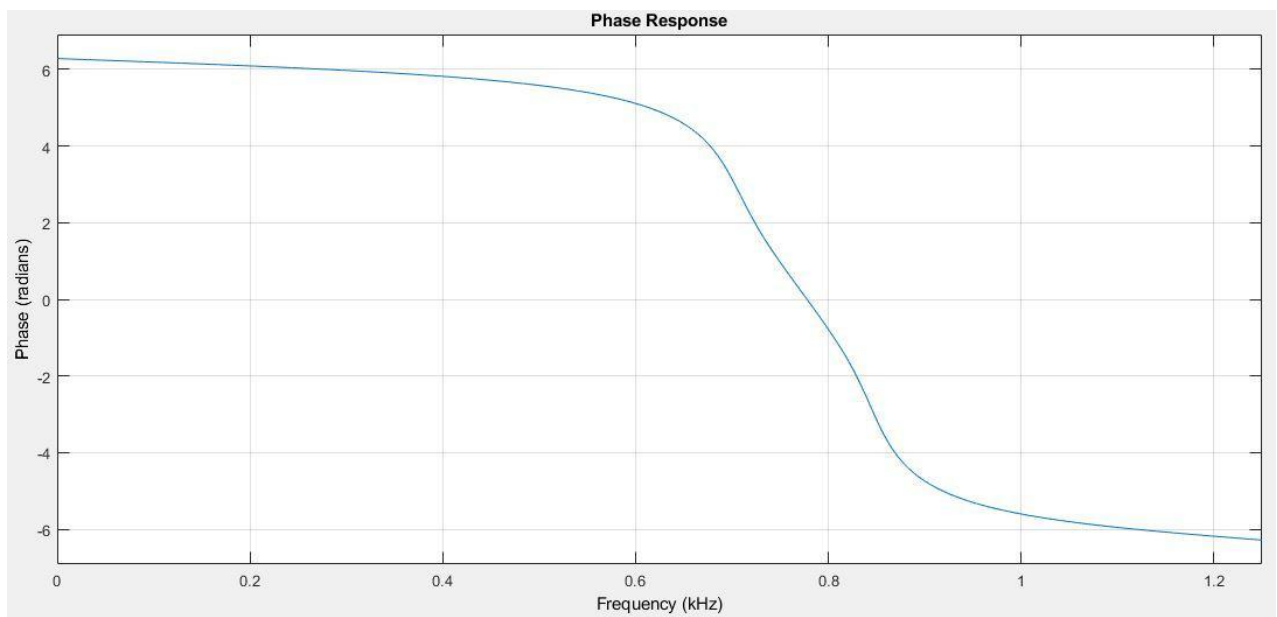
Filtro 4							
	Ganancia	Numerador			Denominador		
Sección 1	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	0,3250	0,8678
Sección 2	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	-0,3250	0,8678
Sección 3	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	0,1258	0,7204
Sección 4	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	1,0767	0,7017

FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIA 700-850 Hz

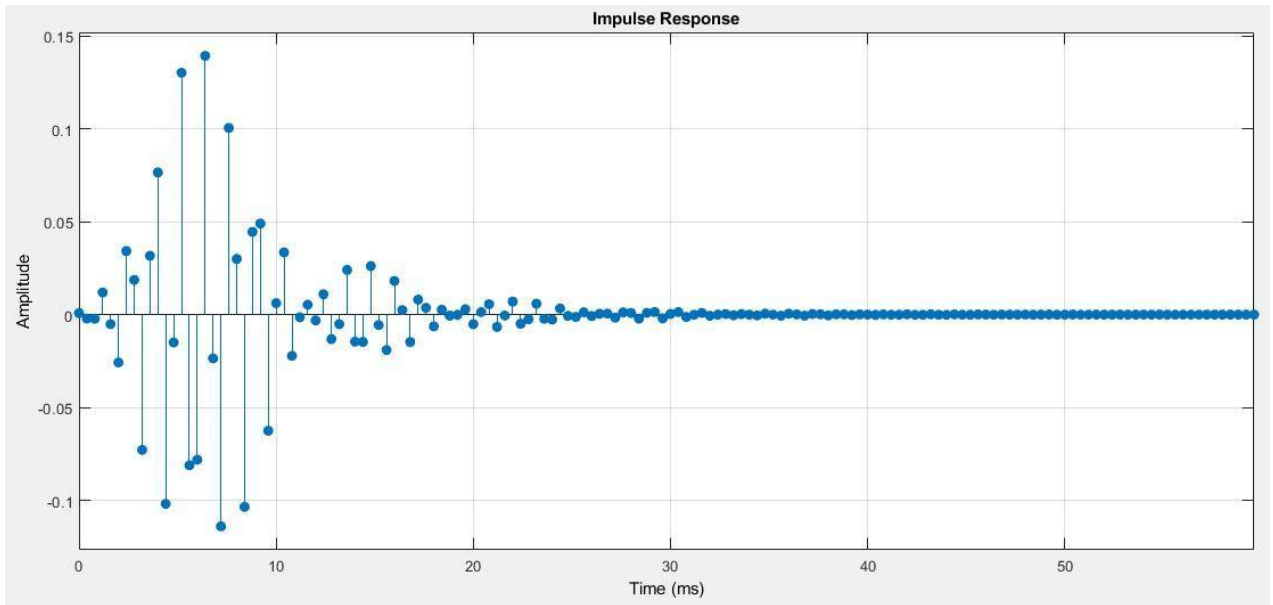
- Respuesta en frecuencia de Amplitud:



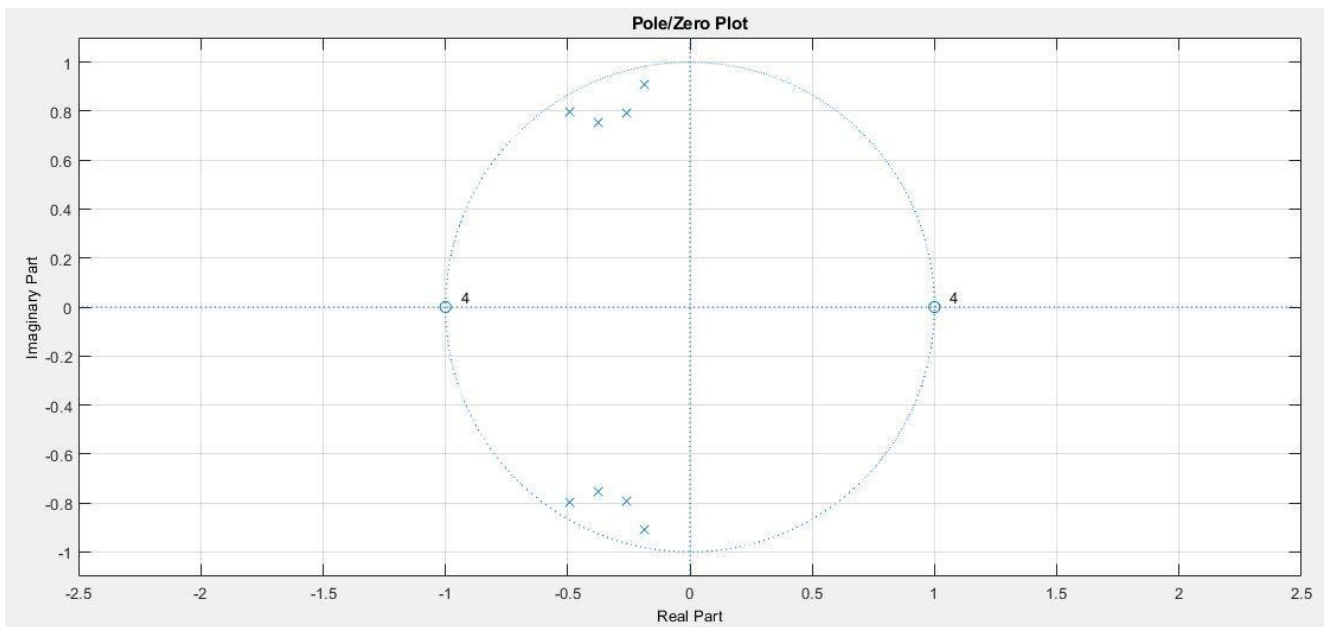
- Respuesta en frecuencia de Fase:



- Respuesta al impulso:



- Diagrama de polos y ceros:

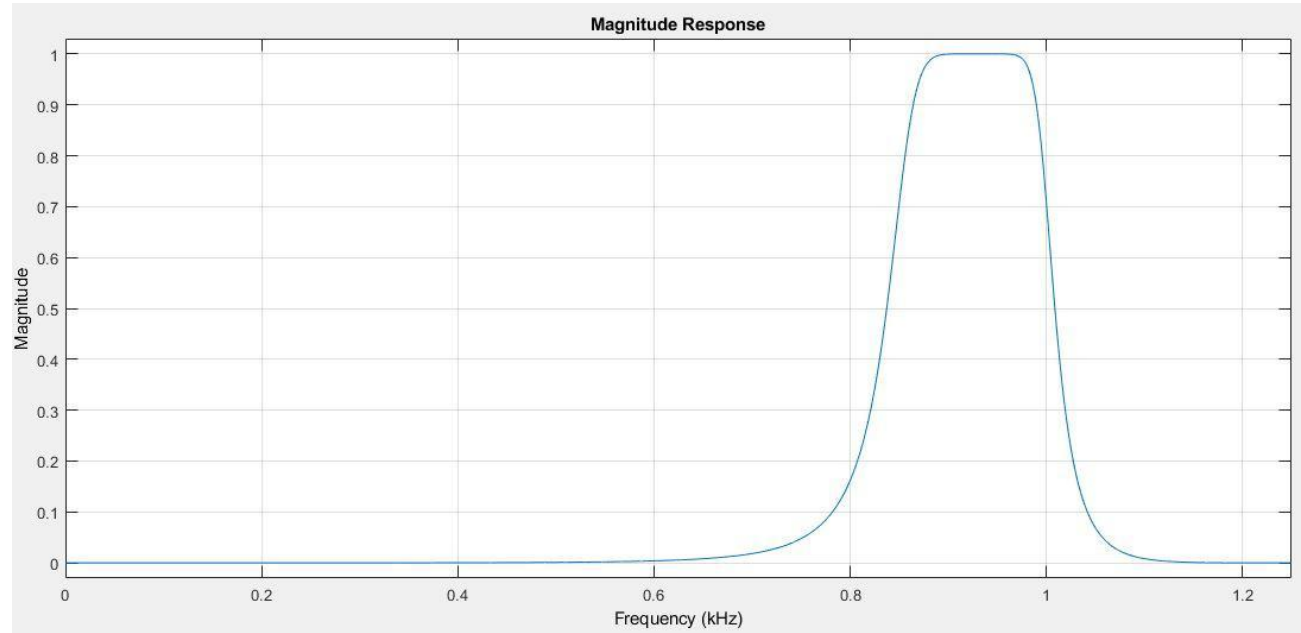


- Coeficientes y realización:

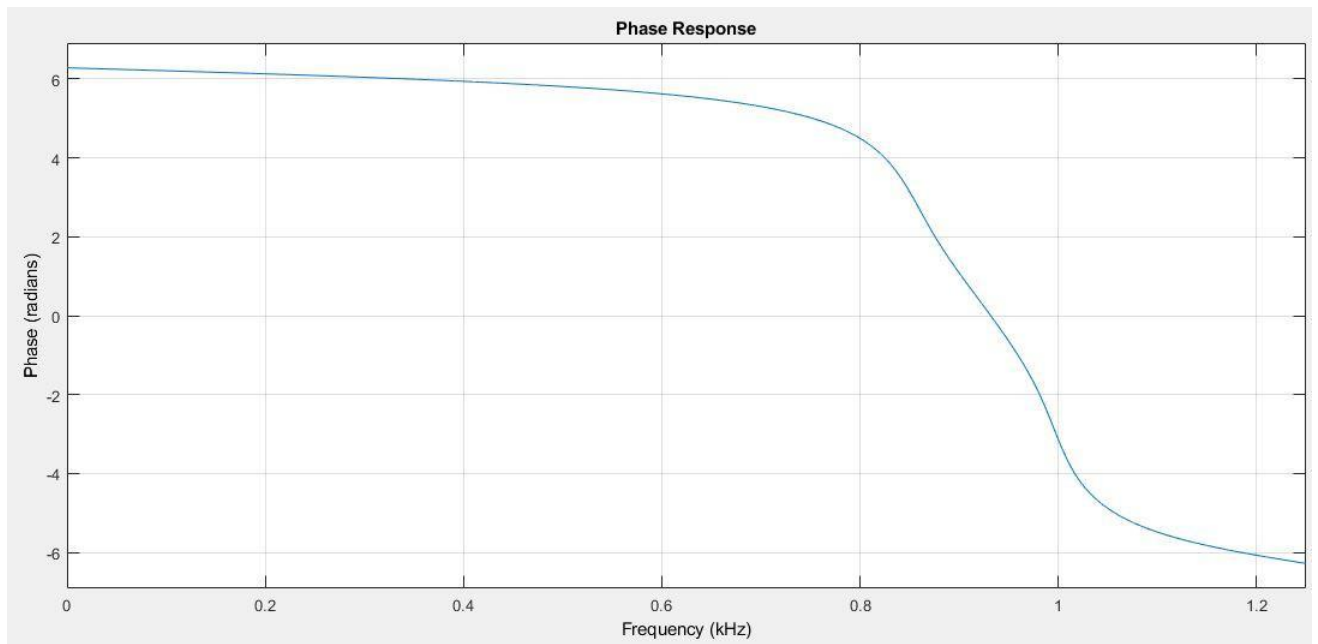
Filtro 5							
	Ganancia	Numerador			Denominador		
Sección 1	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	0,9855	0,8765
Sección 2	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	0,3749	0,8592
Sección 3	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	0,7546	0,7094
Sección 4	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	0,5149	0,6942

FILTRO PASABANDA DE FRECUENCIA 850-1000 Hz

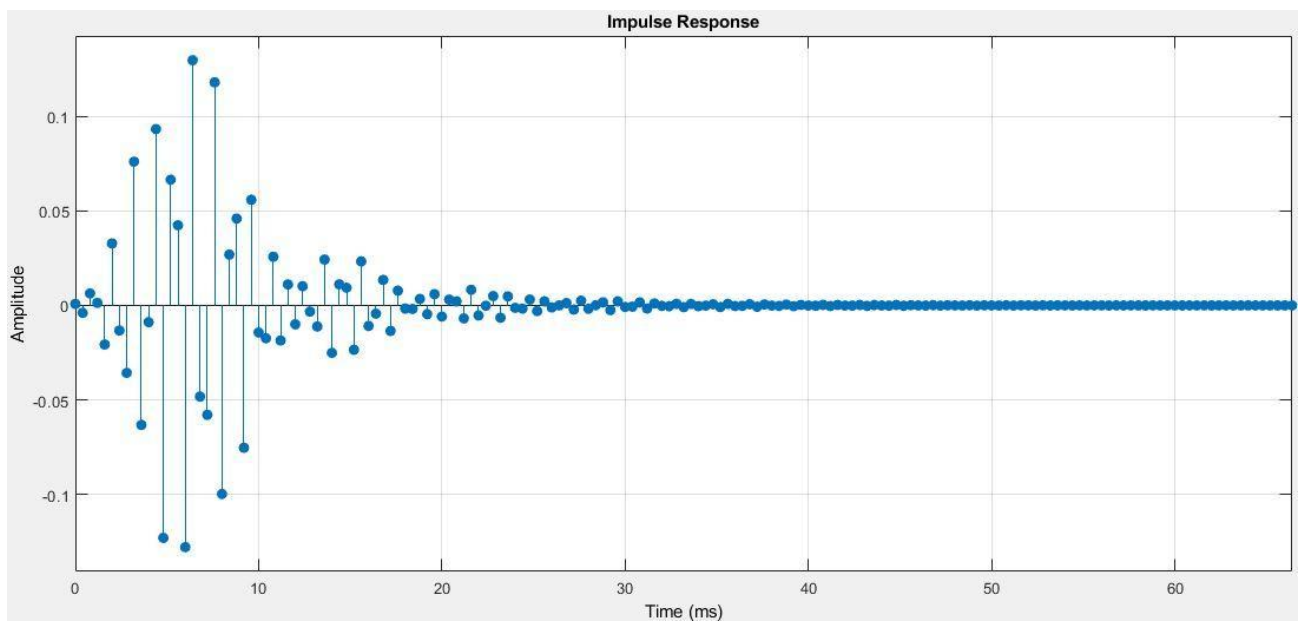
- Respuesta en frecuencia de Amplitud:



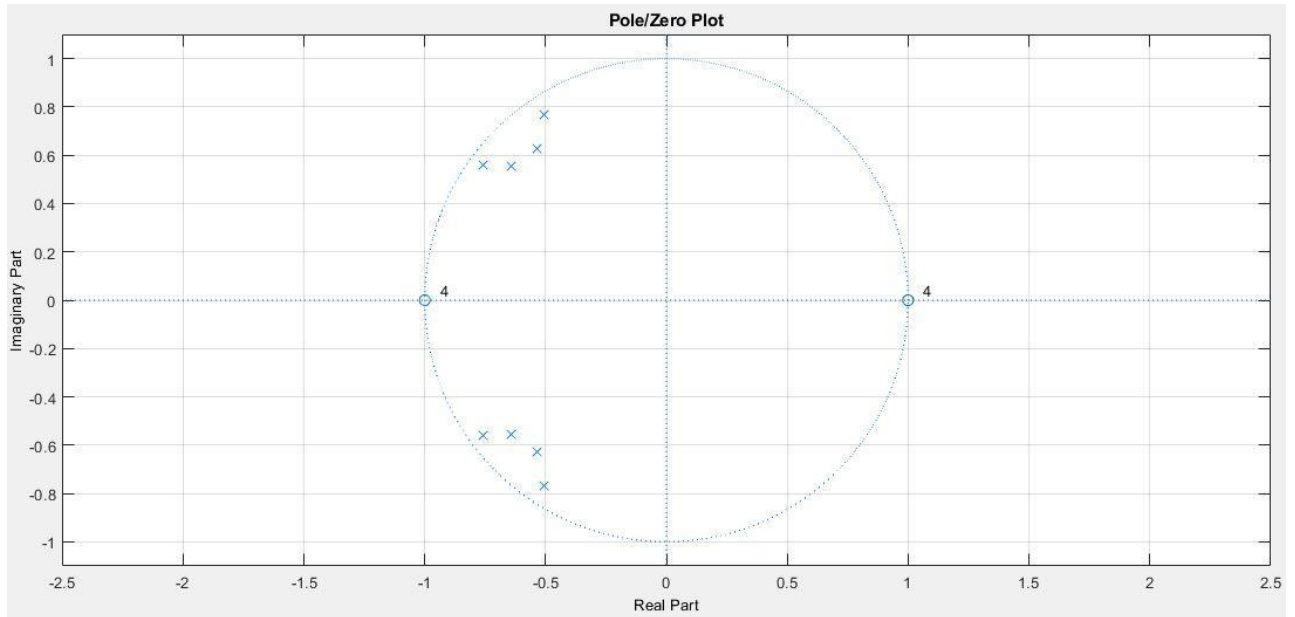
- Respuesta en frecuencia de Fase:



- Respuesta al impulso:



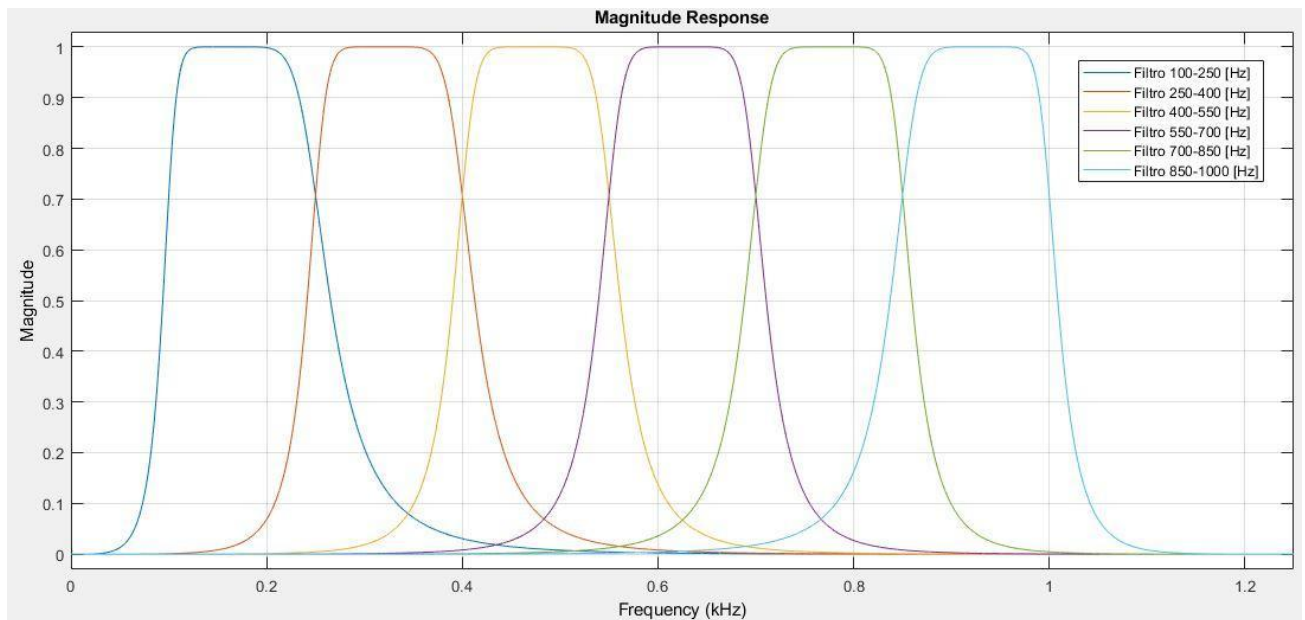
- Diagrama de polos y ceros:



- Coeficientes y realización:

Filtro 6							
	Ganancia	Numerador			Denominador		
Sección 1	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	1,0139	0,8474
Sección 2	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1754	1	0	-1	1	1,5157	0,8887
Sección 3	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	1,2851	0,7204
Sección 4	K	z^0	z^{-1}	z^{-2}	z^0	z^{-1}	z^{-2}
	0,1619	1	0	-1	1	1,0767	0,6835

7. Superponer en un mismo gráfico las respuestas de amplitud de los tres filtros.

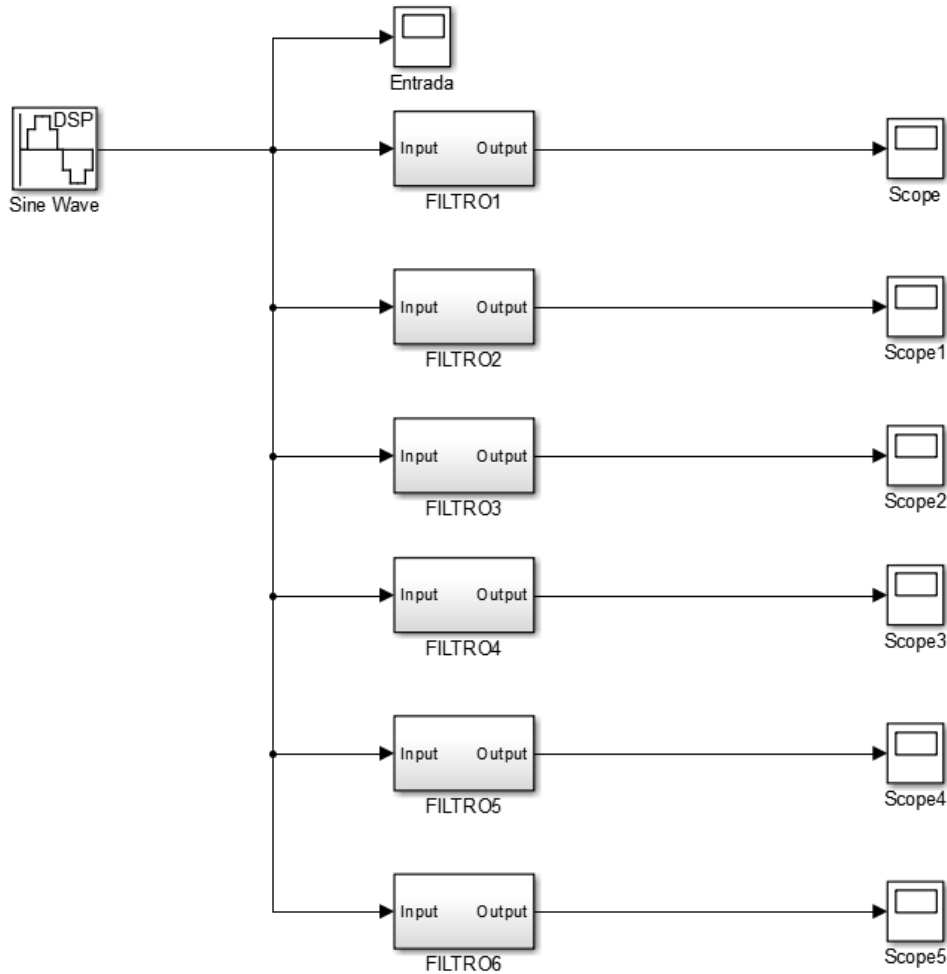


En la respuesta en frecuencia de amplitud podemos observar las seis bandas de frecuencias por las que está compuesto el banco de filtros diseñado. Observamos como las frecuencias de corte especificadas en el enunciado del presente proyecto se encuentran correctamente ubicadas (100[Hz] – 250 [Hz] – 400 [Hz] – 550 [Hz] – 700 [Hz] – 850 [Hz] – 1 [kHz]), y cada filtro posee una pendiente de atenuación bastante pronunciada, lo que nos asegura un mínimo error a la hora de filtrar una señal cuya frecuencia se encuentre cercana a alguna de las frecuencias de corte detalladas anteriormente. Por otro lado, es importante destacar que cada filtro posee una ganancia unitaria para la mayoría de frecuencias comprendidas entre las frecuencias de corte, lo que evita una pérdida de información cuando ésta se encuentre en dichas frecuencias.

Como sugerencia para una posterior implementación de este banco de filtros, tendría en cuenta la aplicación para la cual será utilizado, dado que si requerimos filtrar frecuencias que se encuentren muy cercanas a las frecuencias de corte, se podría aumentar un poco el orden de los filtros de manera que obtengamos una respuesta mucho más precisa a la hora de realizar el filtrado de la señal. Pero en términos generales podemos decir que el banco de filtros digitales funciona correctamente según las especificaciones dadas.

8. Validar los resultados: Verificar el diseño mediante un modelo en Matlab / Simulink.

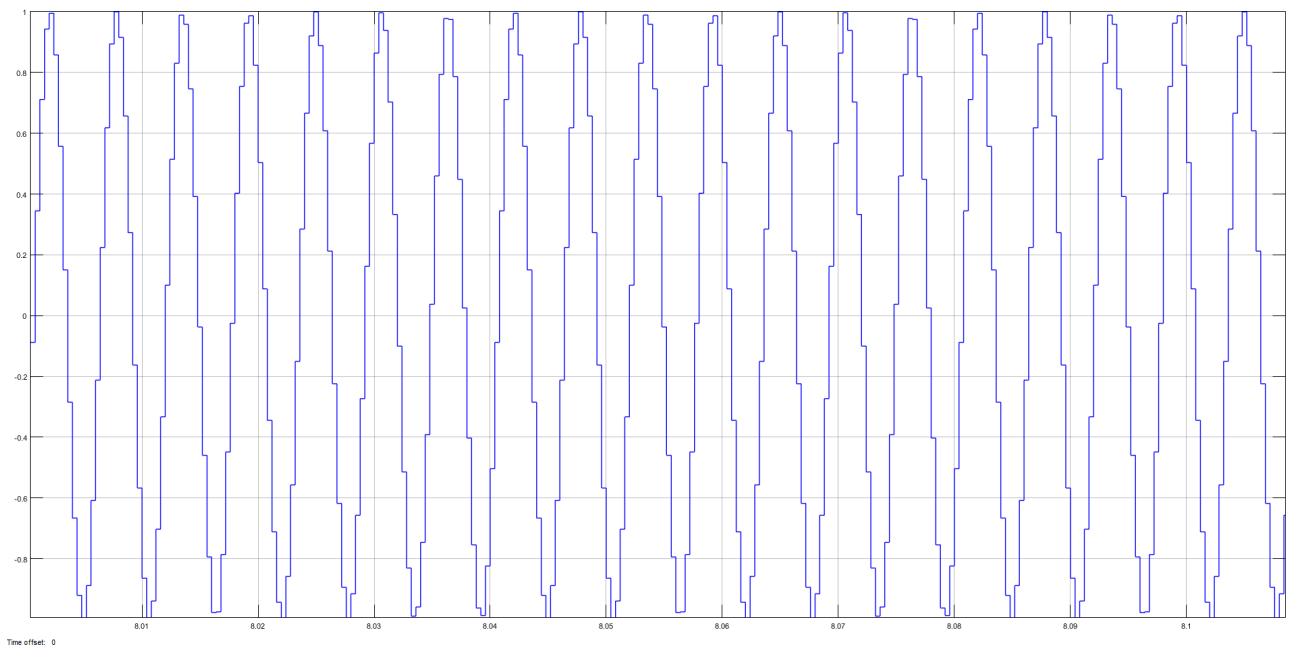
Para realizar la verificación del diseño, se utilizó el siguiente circuito:



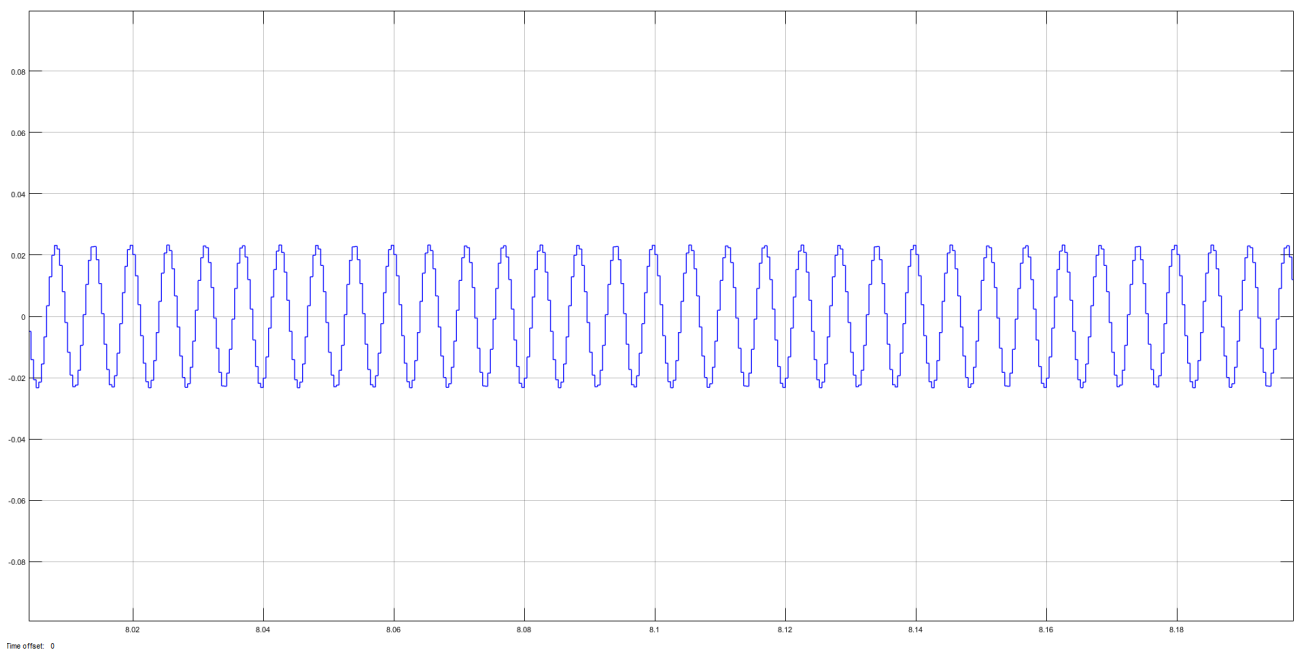
Como fuente de excitación se implementó una fuente sinusoidal de frecuencia variable y amplitud igual a 1 [V]. Esta señal ingresa a los seis filtros y observamos la salida de cada filtro a través de 6 osciloscopios individuales. A continuación, veremos la respuesta de nuestro banco de filtros digitales para distintas frecuencias de entrada.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 175 [Hz]

- Respuesta filtro 1:



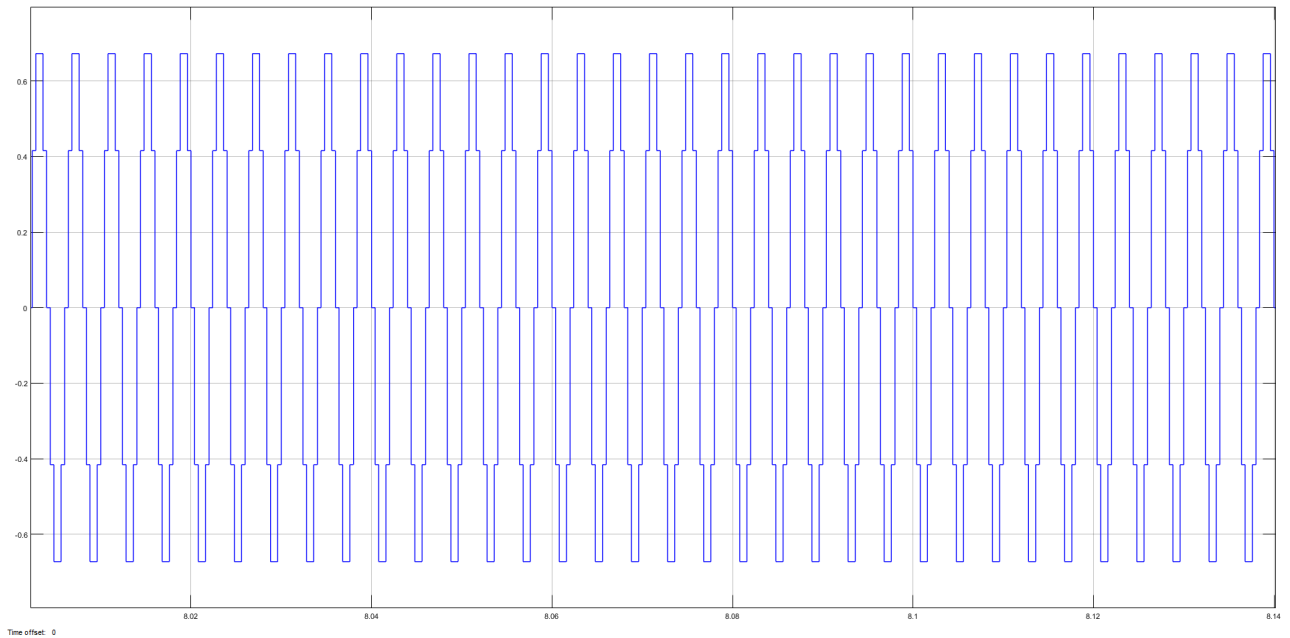
- Respuesta filtro 2:



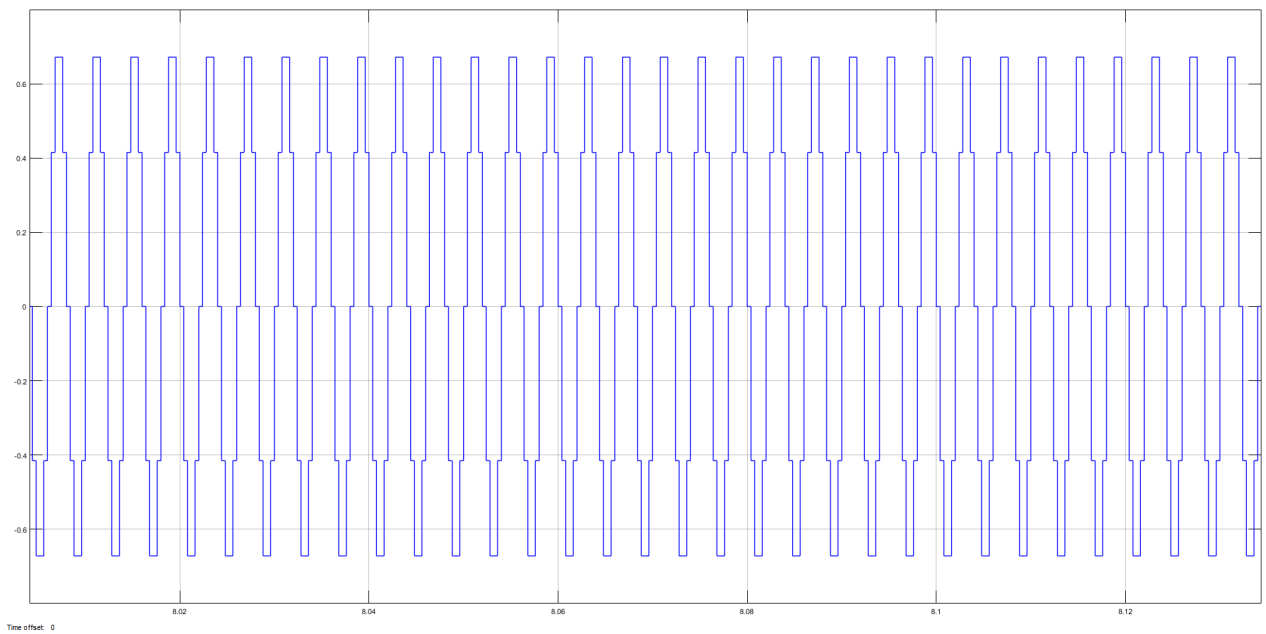
Observamos como la salida del filtro 1 no presenta ninguna atenuación debido a que la señal de entrada es igual a la frecuencia central de éste, mientras que en el filtro 2 se aproxima a los 20dB de atenuación como fue diseñado.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 250 [Hz]

- Respuesta filtro 1:



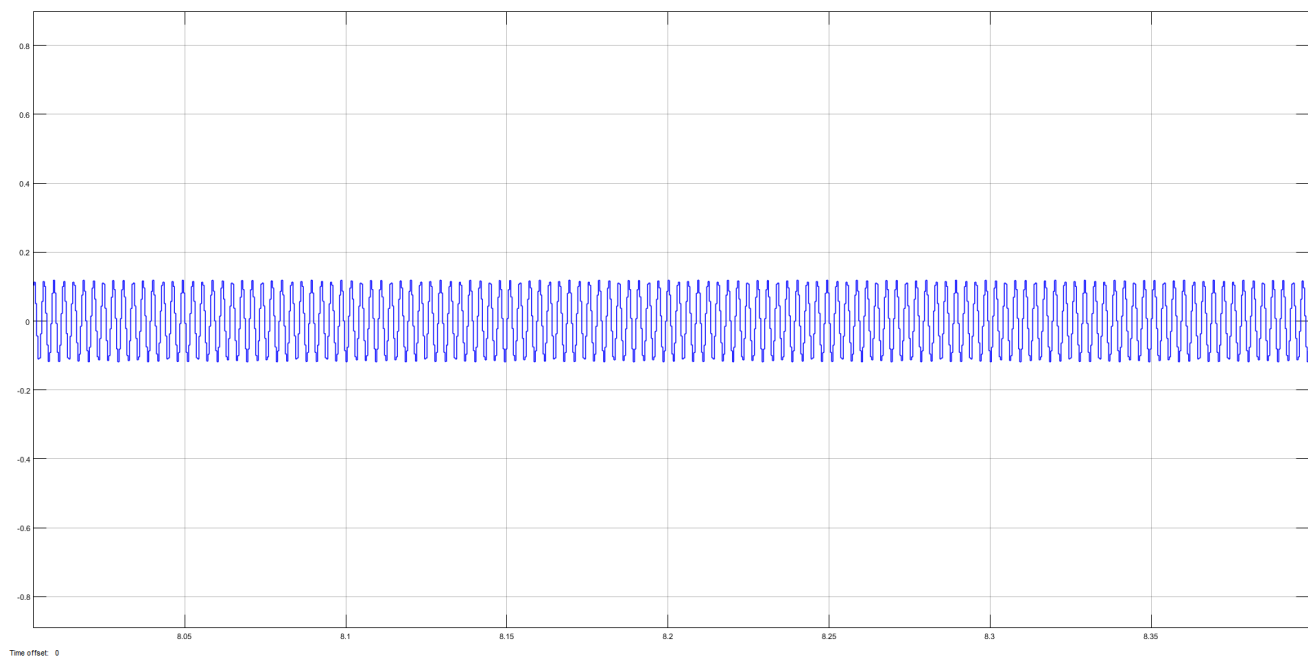
- Respuesta filtro 2:



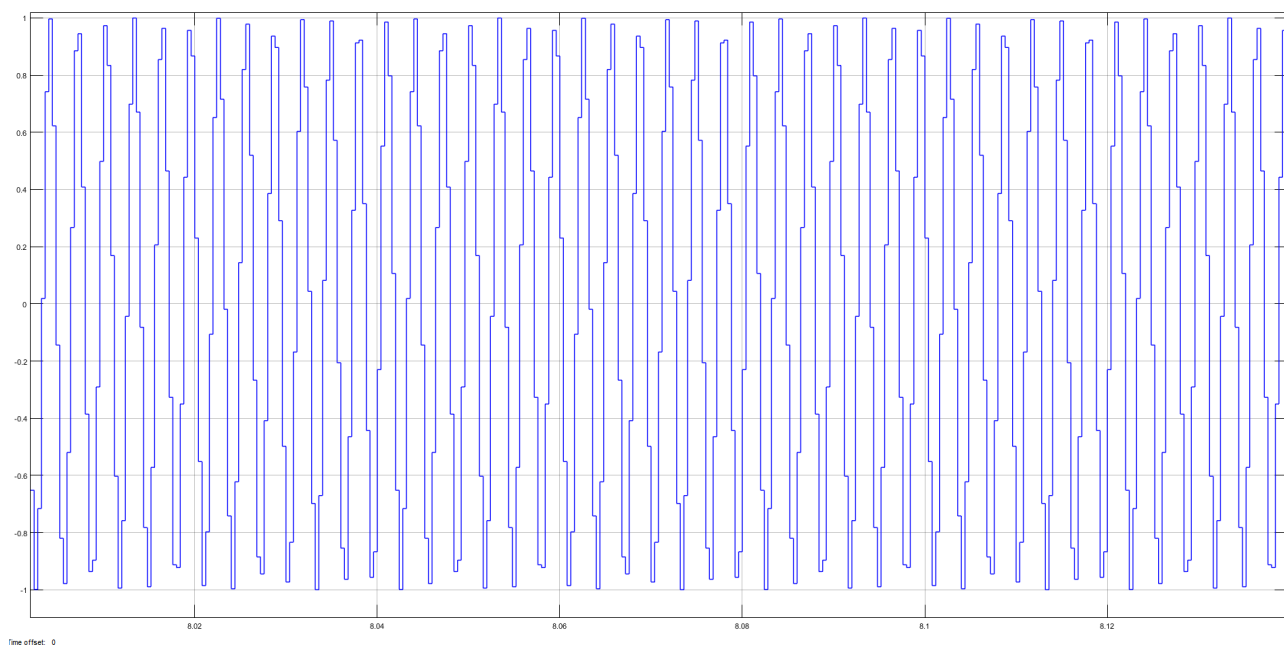
Aquí podemos apreciar cómo al ingresar una señal de frecuencia igual a la frecuencia de corte superior del filtro 1 (que coincide con la f_c inferior del filtro 2) la salida en ambos filtros es idéntica en amplitud y es igual a 0.7 como fue diseñado.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 325 [Hz]

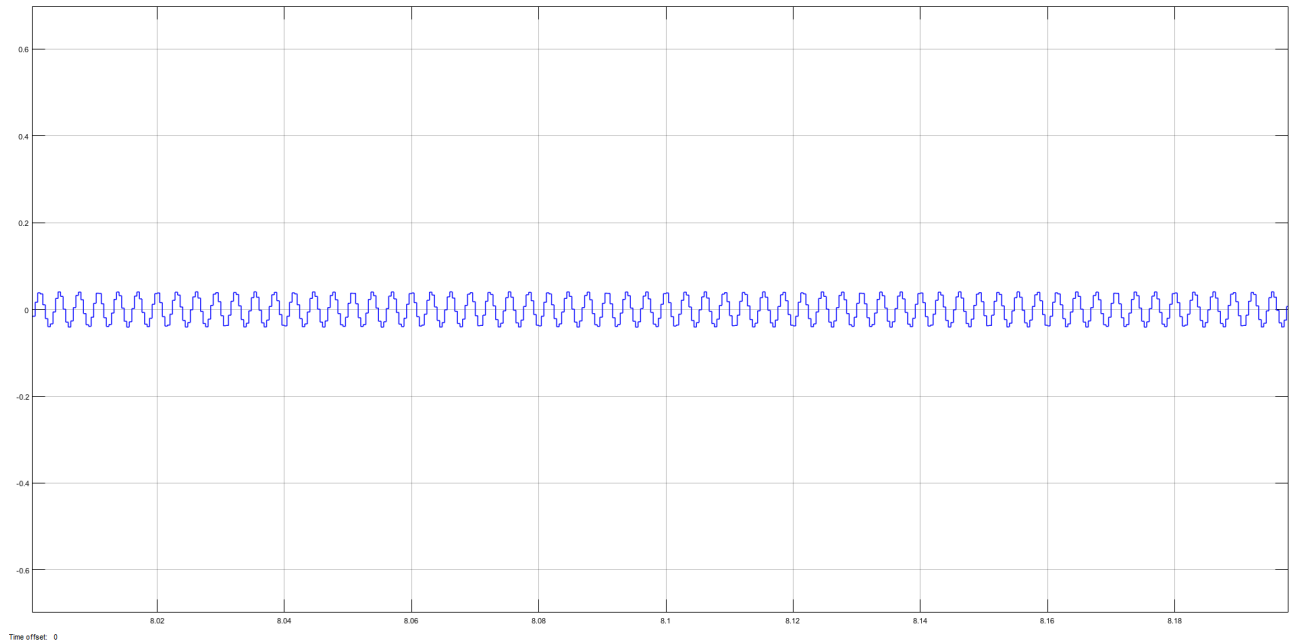
- Respuesta filtro 1:



- Respuesta filtro 2:



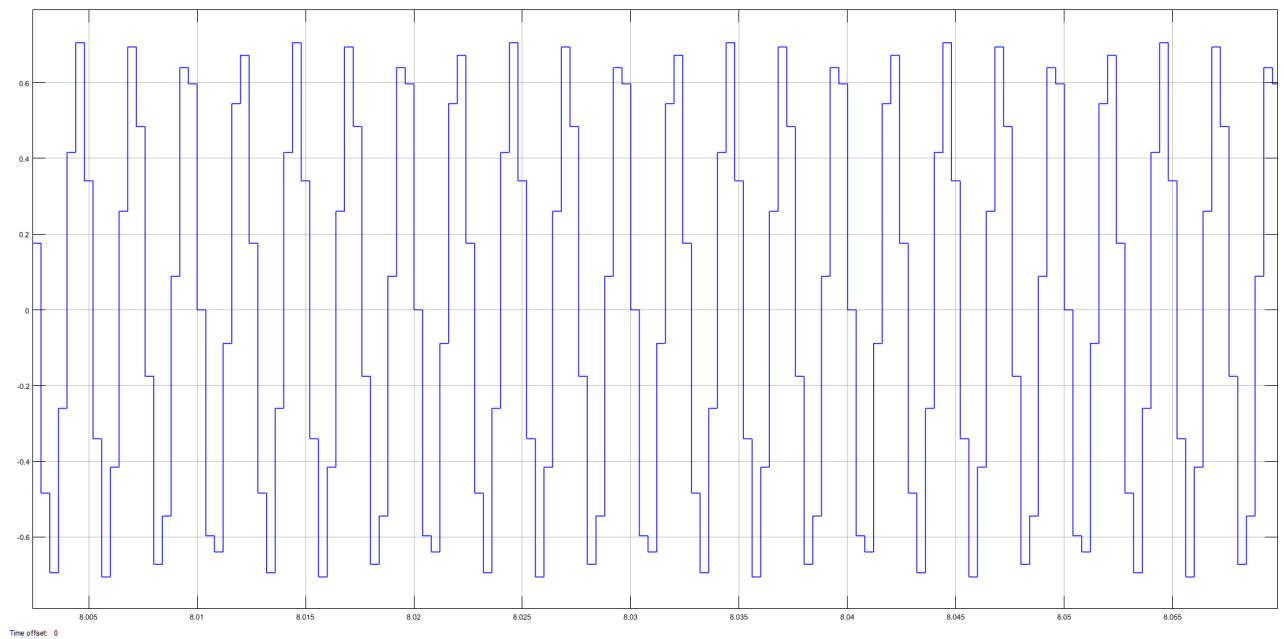
- Respuesta filtro 3:



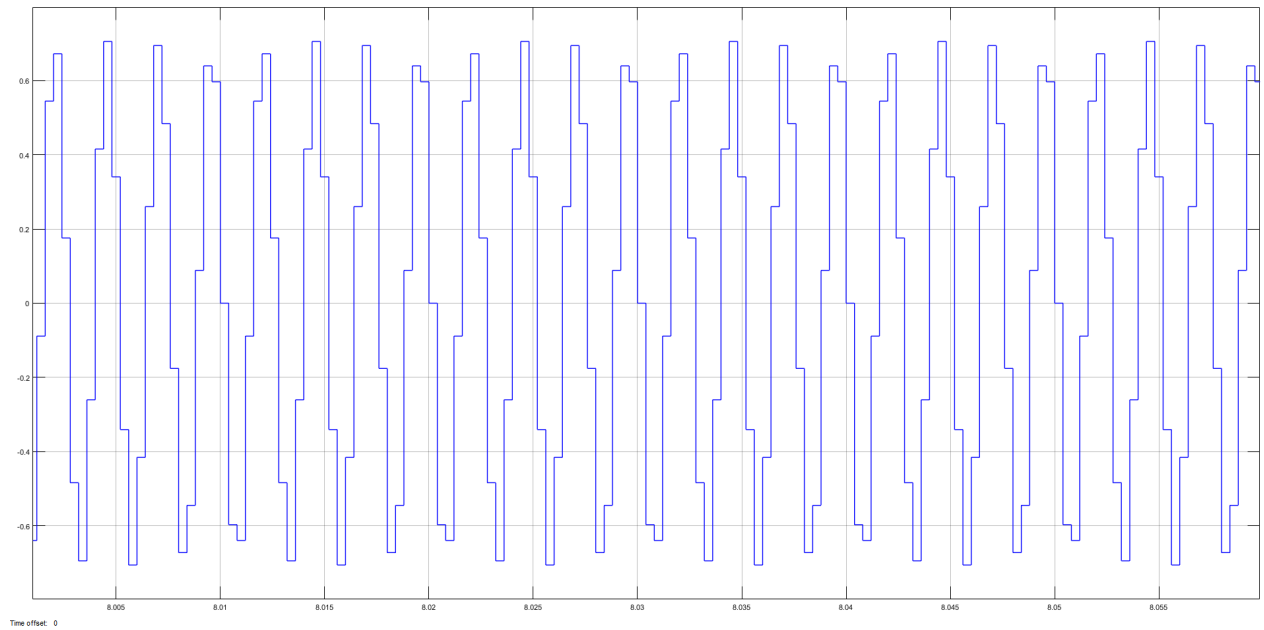
Se puede apreciar cómo al introducir al sistema una señal de frecuencia igual a la frecuencia central del filtro 2, la amplitud a la salida de los filtros 1 y 3 se atenúan prácticamente los 20dB con los que fueron diseñados (0,1 del valor de entrada). Y podemos ver como la amplitud no se ve afectada en el filtro 2.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 400 [Hz]

- Respuesta filtro 2:



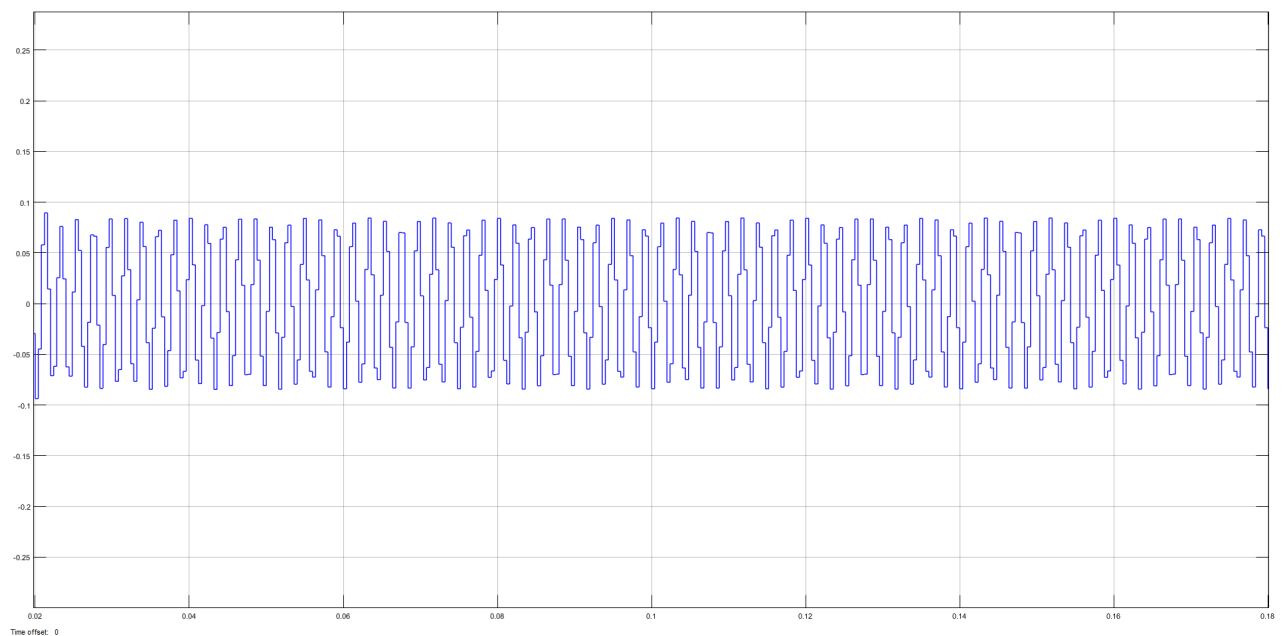
- Respuesta filtro 3:



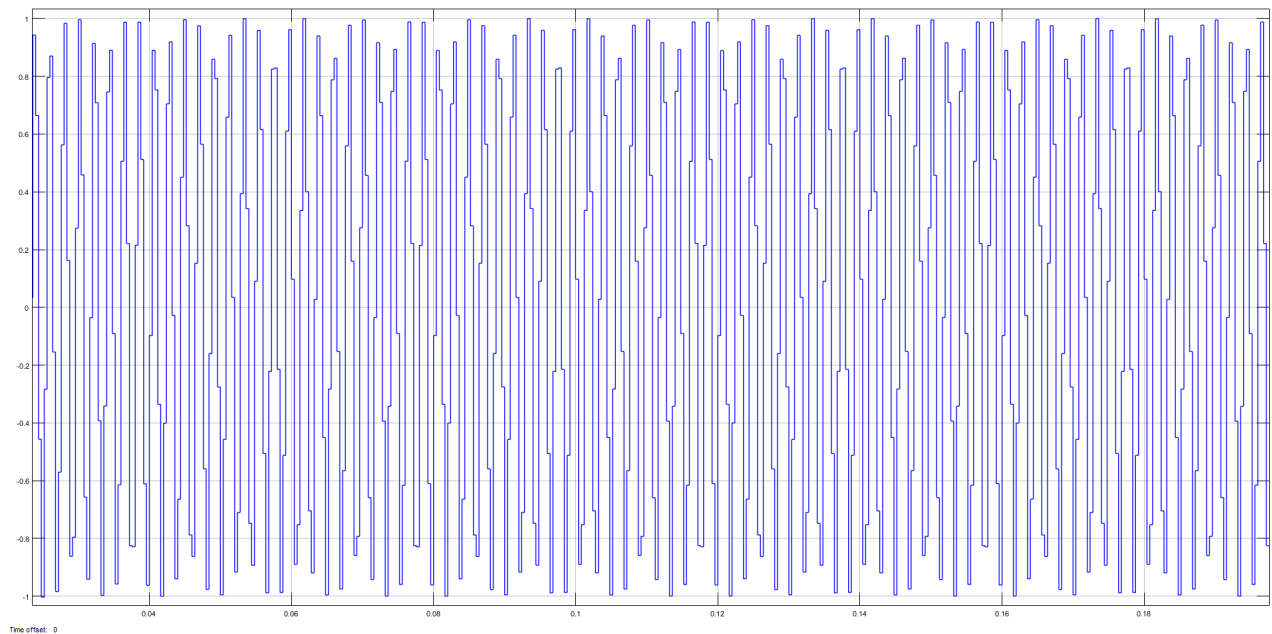
Al introducir una señal de frecuencia 400Hz igual a la frecuencia de corte de los filtros 2 y 3 la amplitud de la señal a la salida de ambos filtros es idéntica e igual a 0,7.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 475 [Hz]

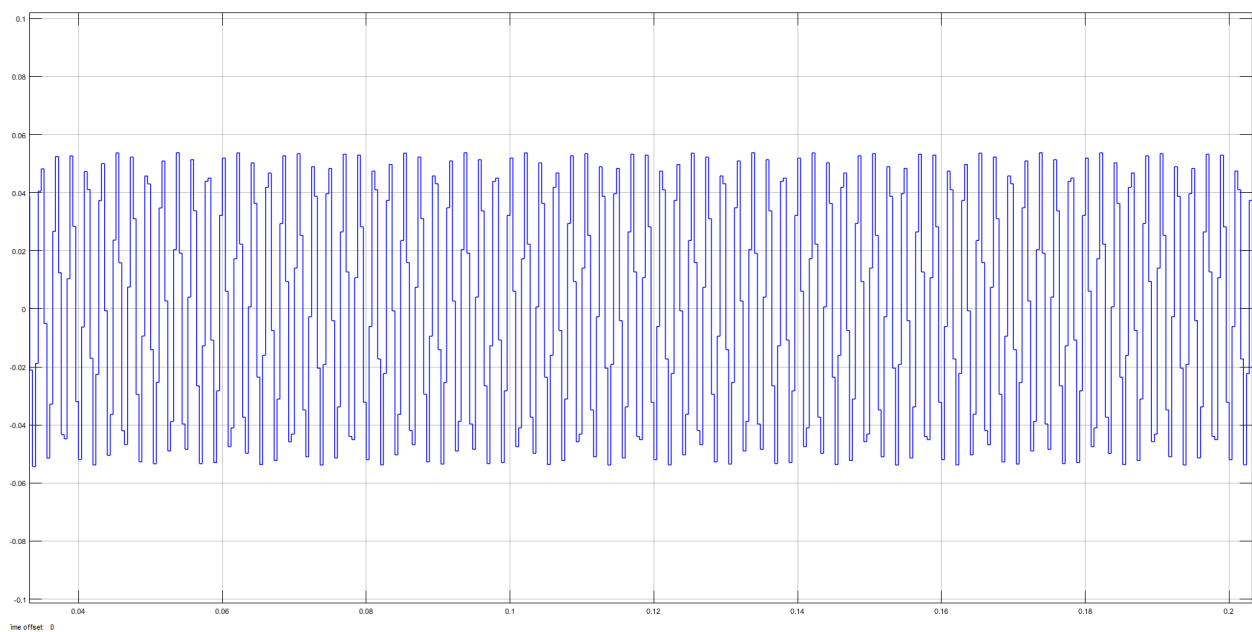
- Respuesta filtro 2:



- Respuesta filtro 3:



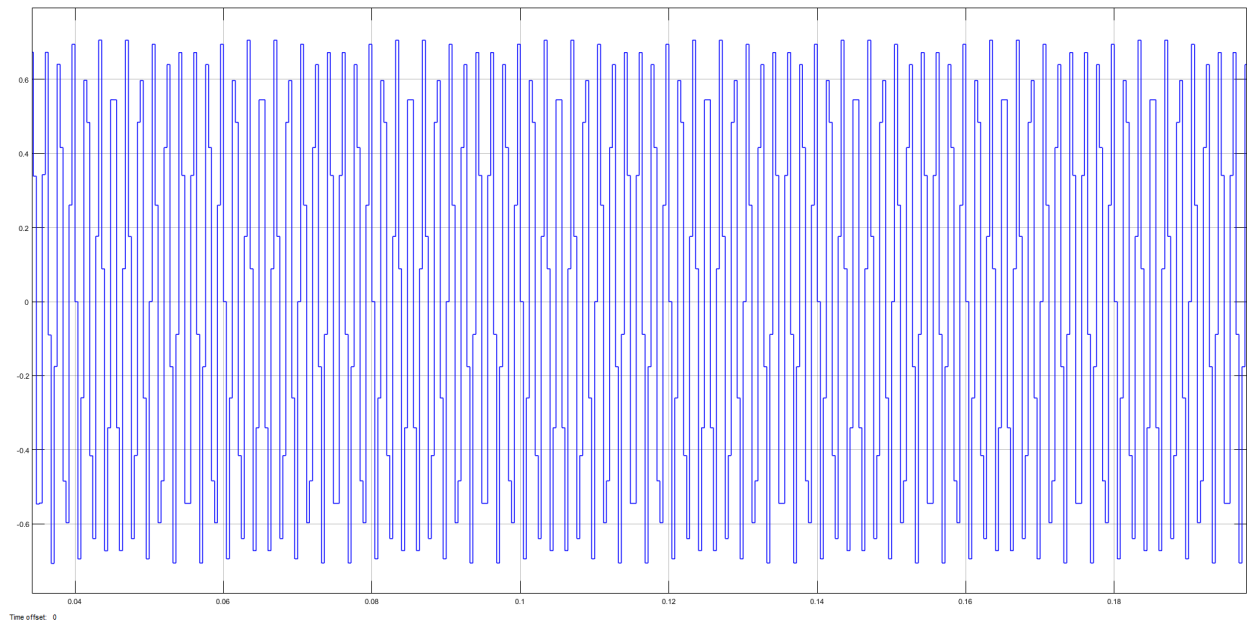
- Respuesta filtro 4:



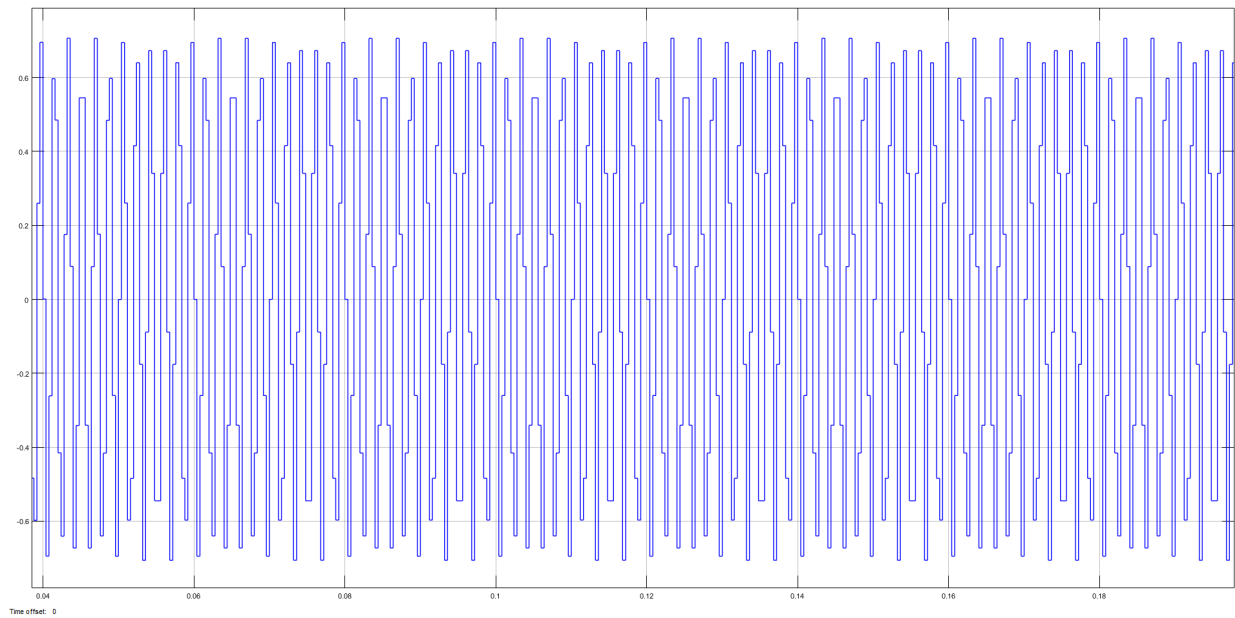
Con una señal de frecuencia igual a la frecuencia central del filtro 3 podemos apreciar cómo la salida en los filtros 2 y 4 está fuertemente atenuada mientras que en el filtro 3 no se atenúa prácticamente nada.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 550 [Hz]

- Respuesta filtro 3:



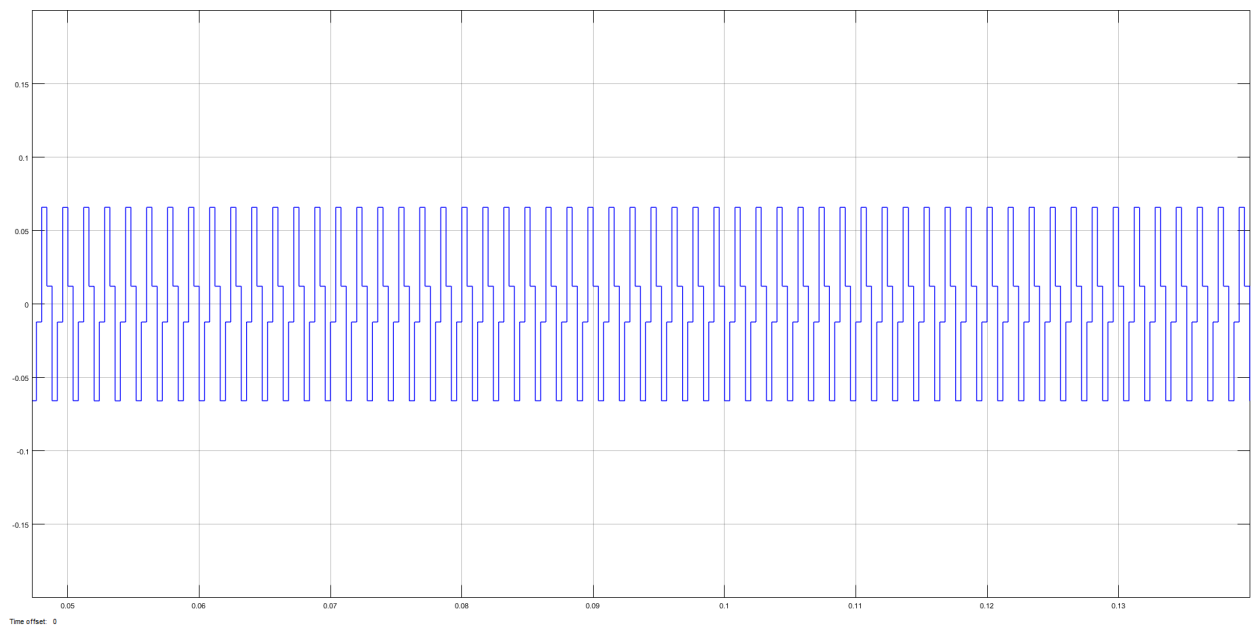
- Respuesta filtro 4:



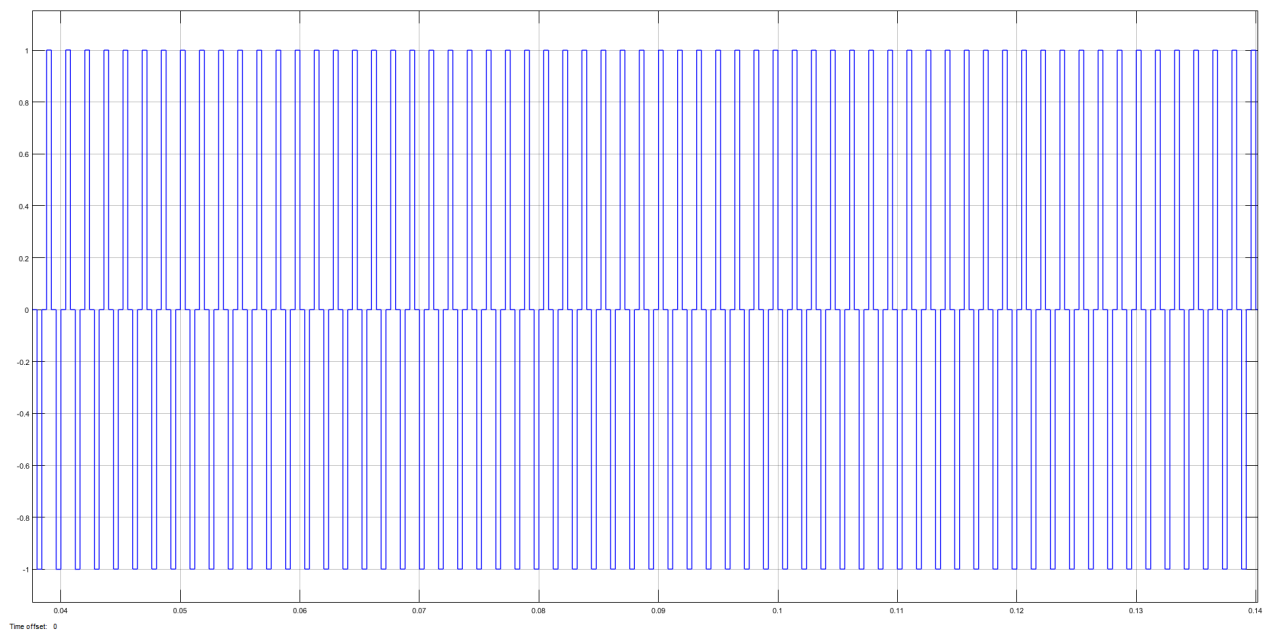
Vemos que al ingresar una señal con frecuencia idéntica a la de corte de los filtros 3 y 4, la salida es prácticamente la misma e igual a 0,7.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 625 [Hz]

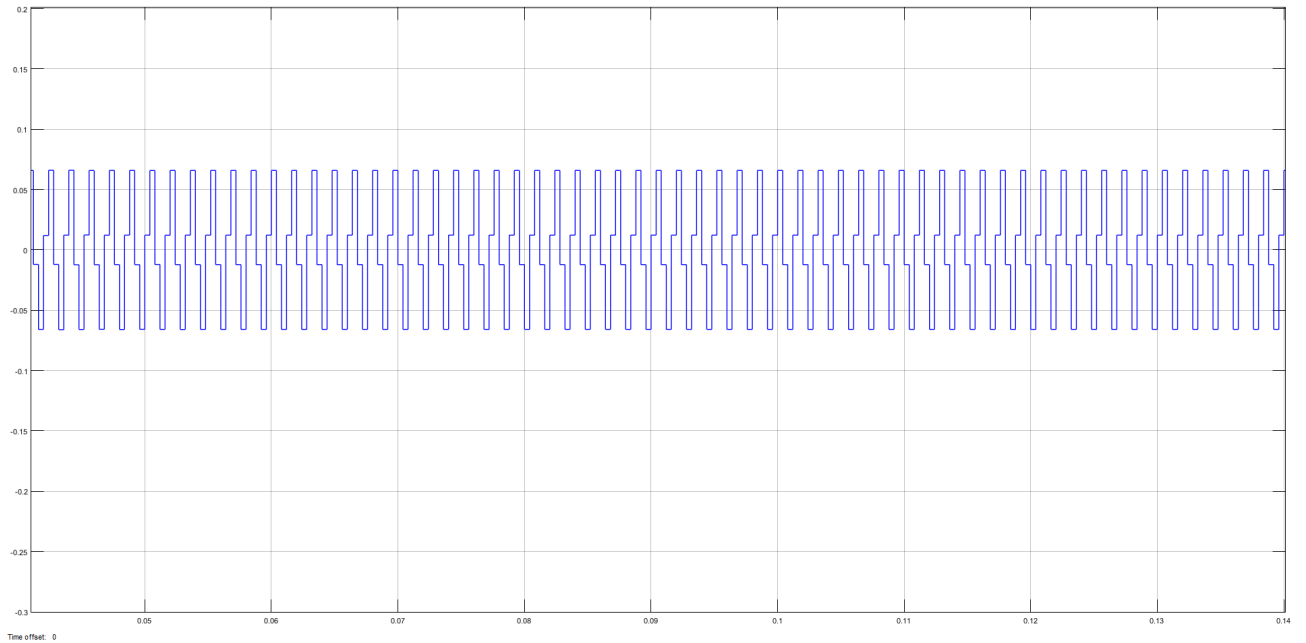
- Respuesta filtro 3:



- Respuesta filtro 4:



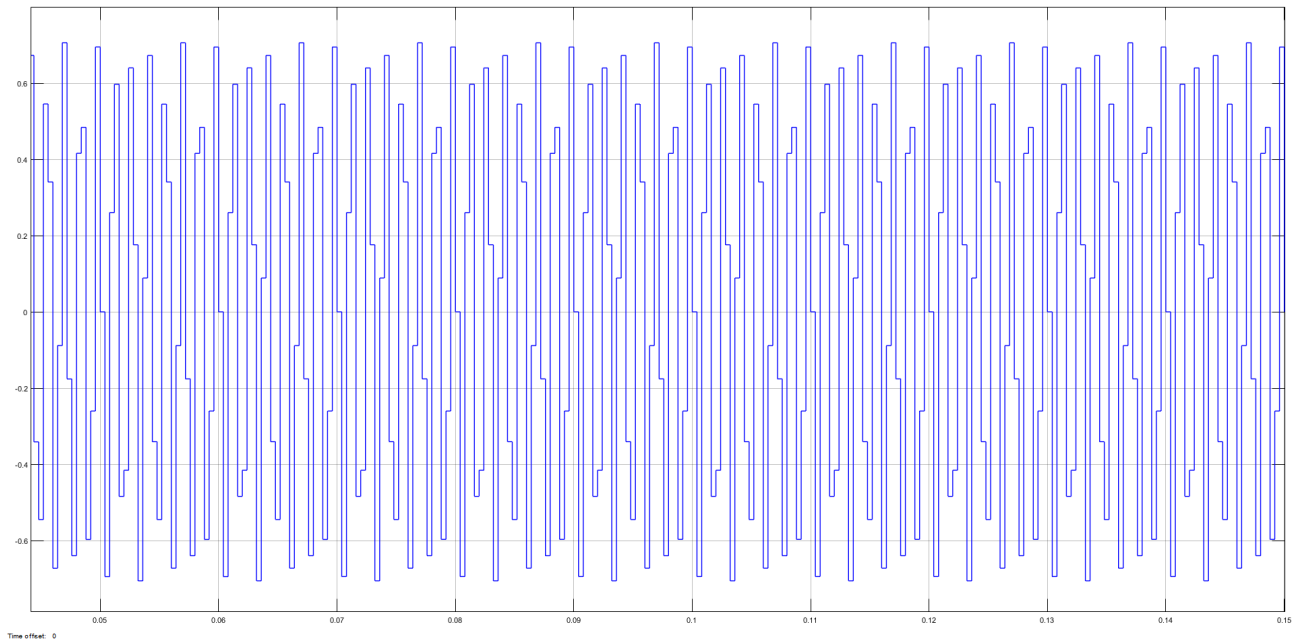
- Respuesta filtro 5:



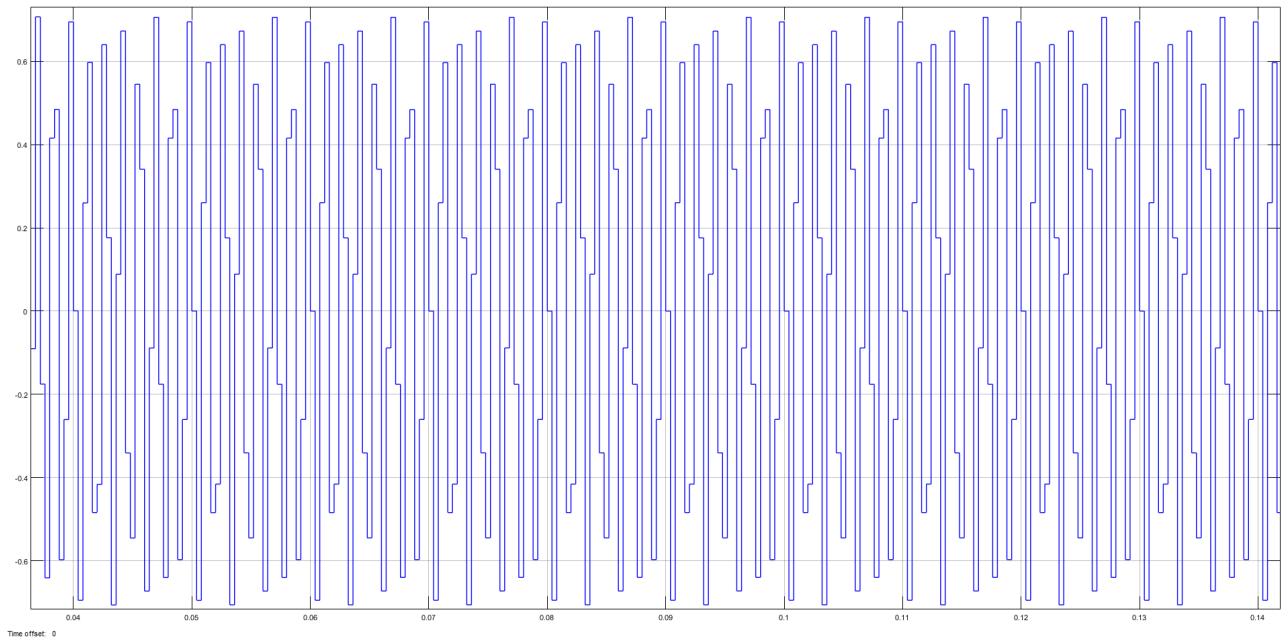
Al introducir una señal con frecuencia idéntica a la frecuencia central del filtro 4 vemos como a la salida de dicho filtro la señal no se ve atenuada, mientras que en los filtros 3 y 5 por encima de los 20dB.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 700 [Hz]

- Respuesta filtro 4:



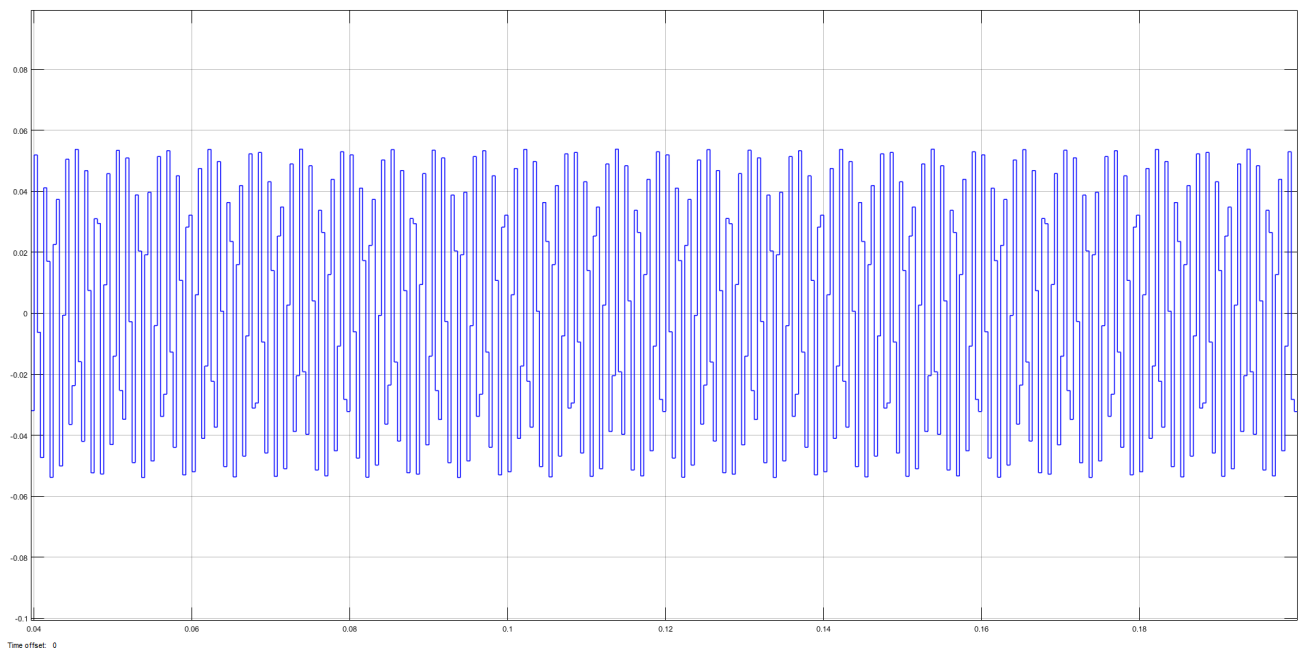
- Respuesta filtro 5:



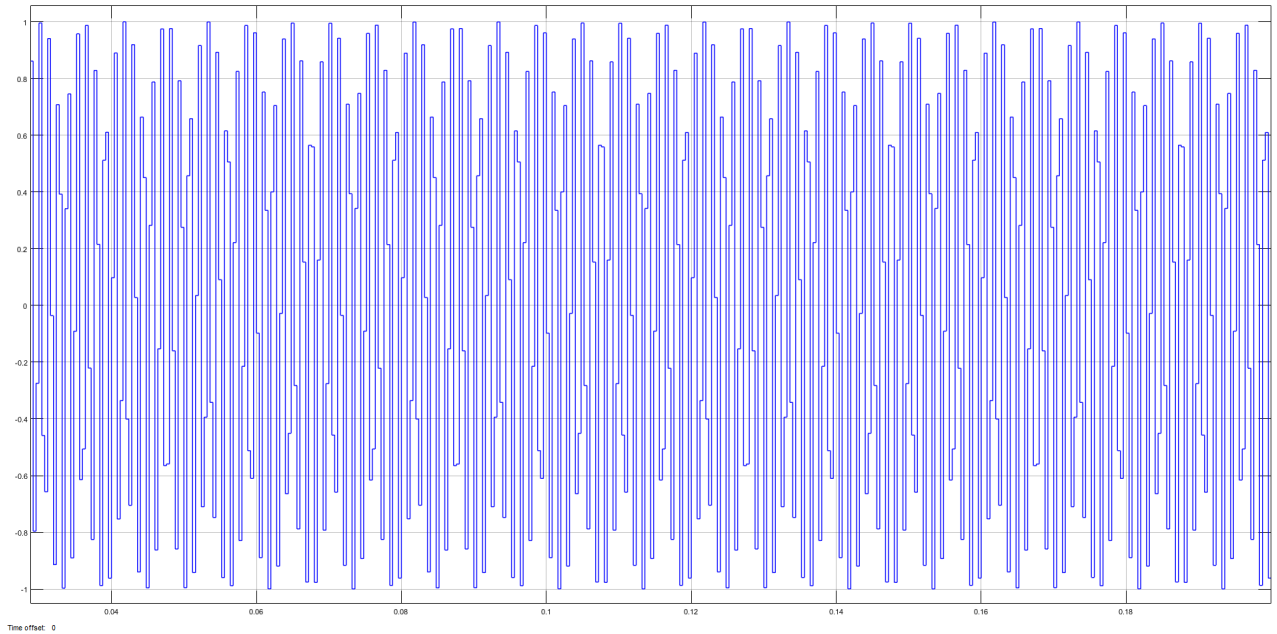
Observamos una salida cuyo valor es 0.7 del valor de entrada, lo cual se corresponde con el diseño al introducir una señal de frecuencia igual a las f_c superior e inferior de los filtros 4 y 5 respectivamente.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 775 [Hz]

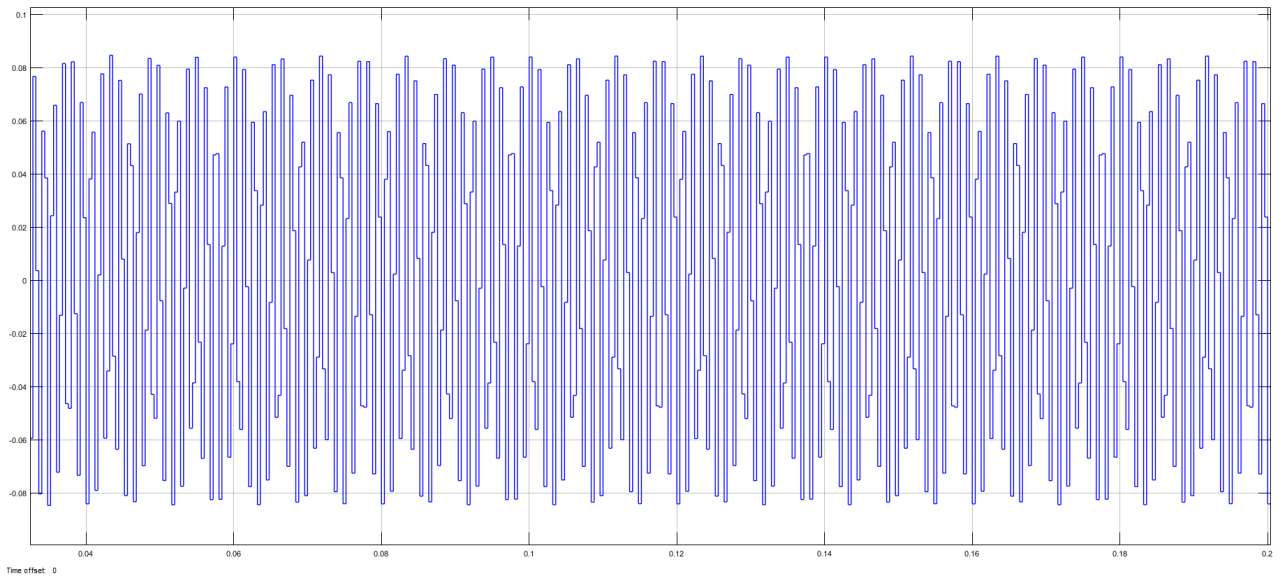
- Respuesta filtro 4:



- Respuesta filtro 5:



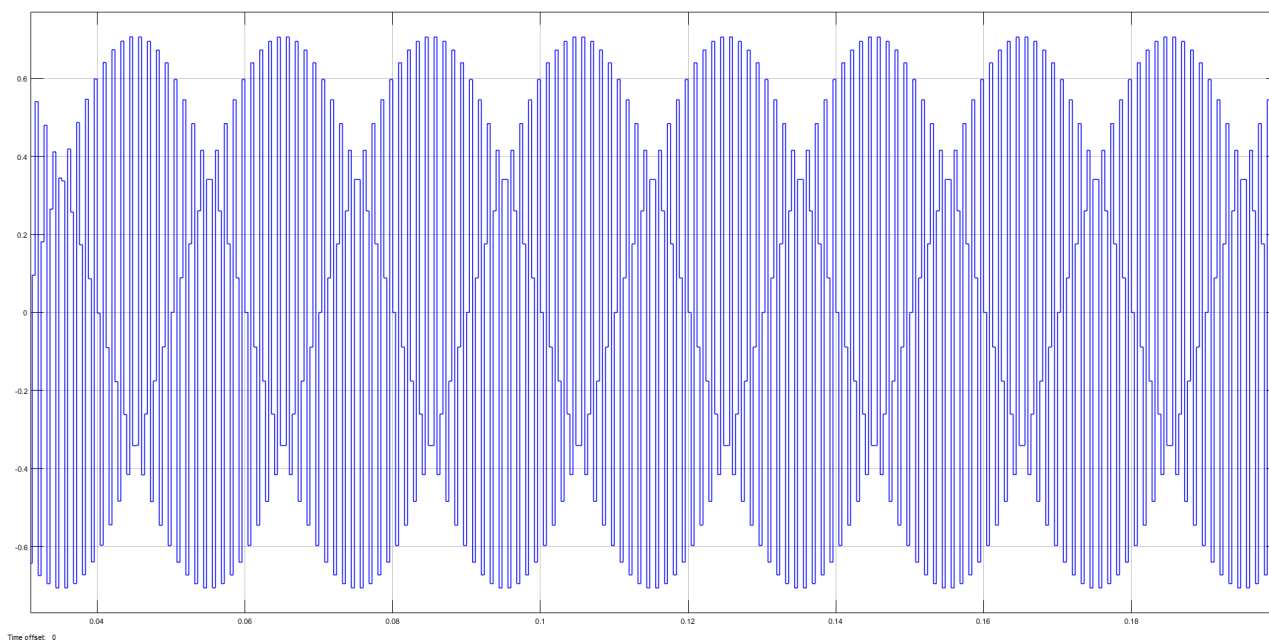
- Respuesta filtro 6:



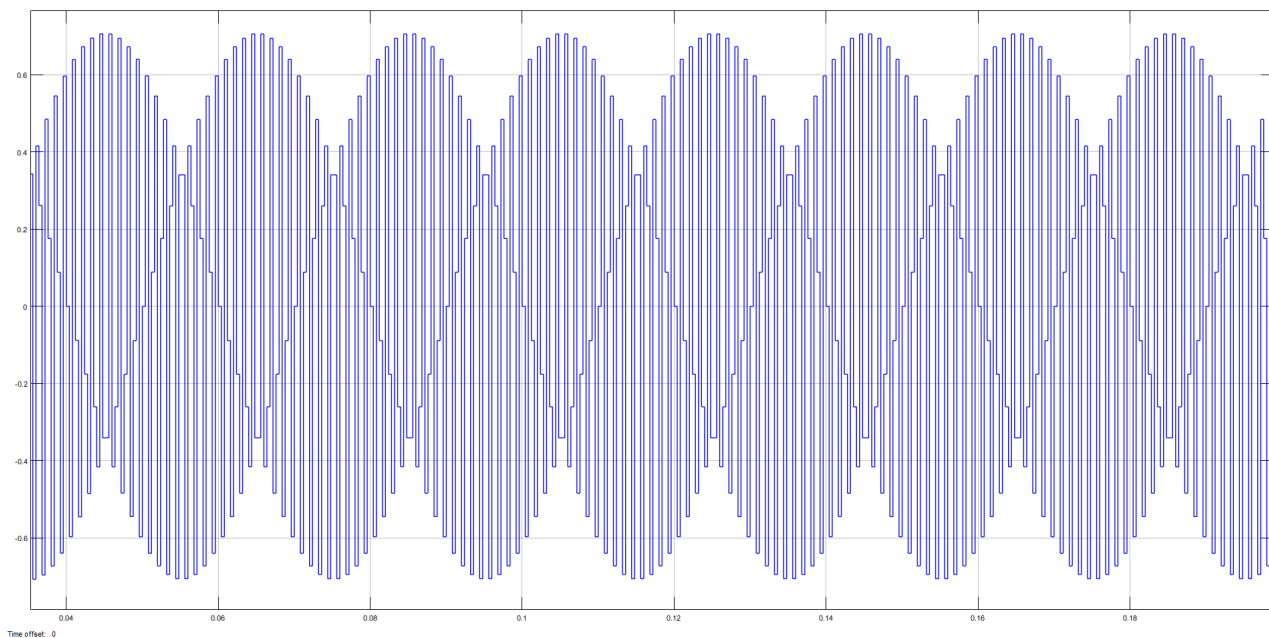
Con una señal de entrada de frecuencia igual a la central del filtro 5, observamos cómo la amplitud no se ve afectada a la salida de este, pero si se ve fuertemente atenuada para los filtros 4 y 6.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 850 [Hz]

- Respuesta filtro 5:



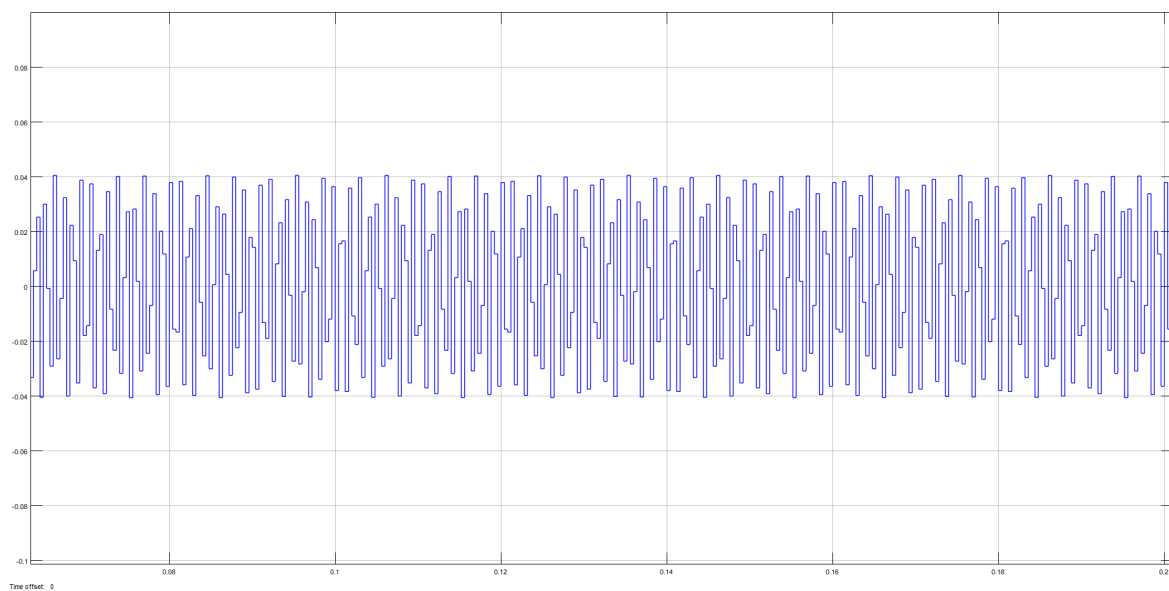
- Respuesta filtro 6:



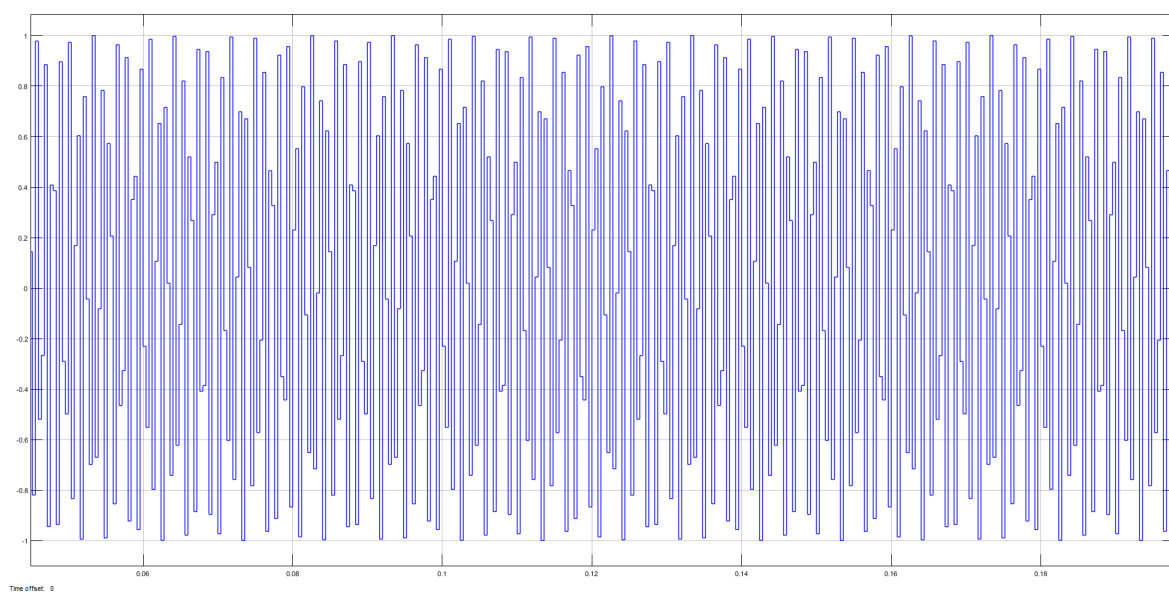
Nuevamente observamos cómo al introducir una señal de frecuencia igual a la de corte de los filtros 5 y 6 la salida se ve atenuada 3dB.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 925 [Hz]

- Respuesta filtro 5:



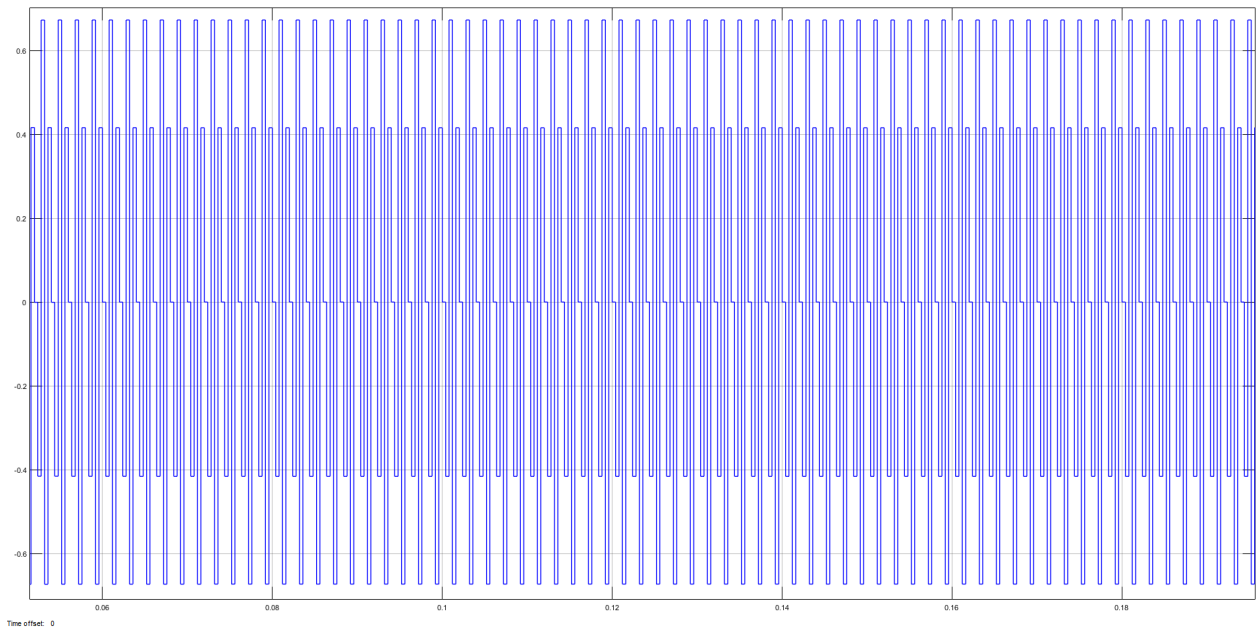
- Respuesta filtro 6:



La salida del filtro 6 no se ve atenuada mientras que la del filtro 5 se atenúa por encima de los 20dB.

FRECUENCIA SEÑAL DE ENTRADA: 1000 [Hz]

- Respuesta filtro 6:



Por último, podemos ver como la salida se atenúa 3dB para una señal de entrada igual de frecuencia igual a la frecuencia de corte del filtro 6.

CONCLUSIONES

Una vez realizado el diseño, implementación y verificación del banco de filtros digitales para el rango de frecuencias asignado, podemos concluir que el resultado final cumple con las especificaciones requeridas al momento de comenzar este proyecto. El banco de filtros presenta respuestas correctas y aceptables para las diferentes señales de entrada permitidas, atenuando aquellas que no se encuentran en el rango de frecuencias de cada filtro y permitiendo su paso sin pérdida para aquellas frecuencias que si se hallan en el rango de cada filtro.

En cuanto a la atenuación para las frecuencias por fuera de la banda de cada filtro, podemos decir que posee un buen grado de atenuación, con una pendiente pronunciada, lo que nos asegura el mínimo error posible a la hora de procesar la información de salida de nuestro banco de filtros de acuerdo al rango de frecuencias deseado para el análisis.

Como conclusión final podemos decir que el presente proyecto significó un desafío para nosotros, pero el mismo fue afrontado gracias a todos los conocimientos tanto teóricos como prácticos adquiridos durante el cursado de la materia, los cuales fueron de gran ayuda para

resolver los distintos problemas que se nos fueron planteando en el transcurso del desarrollo del banco de filtros digitales.

Bibliografía:

- Apuntes proporcionados por la cátedra.
- Lawrence Rabiner & Bernard Gold, Theory and Application of Digital Signal Processing, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. Cap.4, pp.205.
- C. M. Rader and B. Gold, "Digital Filters Design Techniques in the Frequency Domain", IEEE Press 1972, Digital Signal Processing, Edited by Lawrence R. Rabiner & Charles M. Rader, pp 43.
- A.G. Constantinides, Spectral Transformations for Digital Filters, IEEE Press 1972, Digital Signal Processing, Edited by Lawrence R. Rabiner & Charles M. Rader, pp 110.
- A.G.Constantinides, B.Sc.(Eng.), Ph.D."Spectral Transformations for Digital Filters", Proceedings IEEE, Vol.117, Nº8, August 1970.