

Universidad Nacional de Tucumán - Facultad de Ciencias Exactas y
Tecnología

Procesamiento Digital de Señales (E7Z)

Ingeniería en Computación

Año 2021



Proyecto Integrador

Banco de filtros digitales

Grupo 7

Alumnos:

- Farber, Juan
- Flores Wittich, Pablo José
- Romano, Hugo Leandro
- Sale, Roberto Moisés

Índice

Enunciado	3
Diseño	5
Consideraciones	5
Especificaciones	5
Gráfica de magnitud y fase	8
Realización canónica	11
Amplitud, fase y frecuencia	12
Transformada rápida de Fourier (FFT)	13
FFT para N = 16	14
FFT para N = 32	15
FFT para N = 64	16
Matlab y fdatool	17
Nota MI	17
Magnitud y fase	17
Diagrama de polos y ceros	18
Respuesta al impulso	18
Esquema de realización	18
Coeficientes	19
Nota DO	19
Magnitud y fase	20
Diagrama de polos y ceros	20
Respuesta al impulso	21
Coeficientes	21
Nota RE	21
Magnitud y fase	22
Diagramas de polos y ceros	22
Respuesta al impulso	23
Coeficientes	23

Nota FA	23
Magnitud y Fase	24
Diagrama de polos y ceros	24
Respuesta al impulso	25
Coeficientes	25
Nota SOL	25
Magnitud y Fase	26
Diagrama de polos y ceros	26
Respuesta al impulso	27
Coeficientes	27
Nota LA	27
Magnitud y Fase	28
Diagrama de polos y ceros	28
Respuesta al impulso	29
Coeficientes	29
Nota SI	29
Magnitud y Fase	30
Diagrama de polos y ceros	30
Respuesta al impulso	31
Coeficientes	31
Comparación	31
Simulaciones con Simulink	33
Nota DO: $f = 65,406$ Hz	34
Nota RE: $f = 73,416$ Hz	34
Nota MI: $f = 82,407$ Hz	35
Nota FA: $f = 87,307$ Hz	35
Nota SOL: $f = 97,999$ Hz	36
Nota LA: $f = 110$ Hz	36
Nota SI: $f = 123,471$ Hz	37
Conclusiones	38
Bibliografía	40

Enunciado

Se desea construir un **banco de filtros digitales** para cubrir un rango de 50 a 150 Hz, destinado a un instrumento utilizado para seleccionar las notas musicales básicas de la segunda octava. Para ello se divide el entorno 50 a 150 Hz en **7 bandas** angostas muy selectivas centradas en las frecuencias correspondientes a cada nota:

Do 1: 65,406	Do# 1: 69,296
Re 1: 73,416	Re# 1: 77,782
Mi 1: 82,407	
Fa 1: 87,307	Fa# 1: 92,499
Sol 1: 97,999	Sol#1: 103,826
La 1: 110	La# 1: 116,541
Si 1: 123,471	

Todas las bandas **se deben diseñar a partir de un solo prototipo**, seleccionando para su diseño el rango de frecuencias **más comprometido**, de modo que las bandas pasantes no se superpongan. Cada banda deberá tener una transferencia unitaria a la frecuencia central, y deben estar limitadas por las frecuencias de media potencia (0.707 del valor de máxima transferencia, o -3 dB), cuyo valor se debe calcular en $\sim \pm 2$ Hz respecto de la frecuencia central para evitar el solapamiento entre las notas. (Para calcular la atenuación se puede ir ajustando la frecuencia de atenuación de modo que el orden del filtro prototipo no sea superior a 10).

- Para el diseño utilizar las técnicas de diseño: (1) **DIRECTA**
- Como prototipo pasa bajos utilizar un filtro: (2) **BUTTERWORTH**

Desarrollar analíticamente los siguientes puntos y graficar usando Matlab:

1. Especificar el orden del filtro que cumpla las especificaciones.
2. Aplicar el método de diseño indicado para obtener los coeficientes del filtro prototipo y del filtro pasa banda correspondiente a una de las notas. Graficar la respuesta en frecuencia de ambos.
3. Proponer una estructura de realización e indicar de qué tipo es.

4. Encontrar la respuesta en frecuencia Amplitud $|H(\omega)|$ y Fase $\Phi(\omega)$ vs. Frecuencia ω , con $\omega_{\text{máx}} = \pi/T$. Expresar los resultados en una gráfica de $\sim 10\text{cm}$ en ordenadas (Amplitud y Fase) por $\sim 15\text{ cm}$ en abscisas (Frecuencia).
5. Encontrar la respuesta temporal del filtro diseñado.
6. Encontrar la FFT usando la respuesta al impulso para $N=16, 32$ y 64 . Representar gráficamente. Comparar las curvas obtenidas, y con la respuesta en amplitud.
7. Usando el entorno fdatool de Matlab, diseñar los filtros correspondientes a cada nota, con sus respectivas gráficas de respuesta en frecuencia, respuesta al impulso, polos y ceros, coeficientes y realización. Luego superponer en un mismo gráfico las respuestas de amplitud de los siete filtros.
8. Escribir conclusiones, observaciones y sugerencias sobre los resultados obtenidos.
9. Verificación del diseño: Implementar una simulación computacional en Matlab/Simulink visualizando la salida del sistema, utilizando una señal de excitación sinusoidal en el rango de frecuencias permitidas por el diseño.

Diseño

A continuación explicaremos cómo calcular un filtro digital Butterworth a través del método DIRECTO. Las frecuencias de corte, atenuación y central para cada nota están dadas en la siguiente tabla:

Tabla: Frecuencias de cada nota.

Nota	f_{stop1}	f_{pass1}	f_o	f_{pass2}	f_{stop2}
Do	61,406	63,406	65,406	67,406	69,406
Re	69,416	71,416	73,416	75,416	77,416
Mi	78,407	80,407	82,407	84,407	86,407
Fa	83,307	85,307	87,307	89,307	91,307
Sol	93,999	95,999	97,999	99,999	101,999
La	106	108	110	112	114
Si	119,471	121,471	123,471	125,471	127,471

Consideraciones

Tomaremos la siguiente consideración de manera de evitar repetir cálculos, como podemos observar en la tabla anterior la región espectral más comprometida es la que corresponde a las notas MI y FA dada su cercanía en frecuencia (dichas notas tienen una distancia de un semitono mientras que las otras tienen una distancia de un tono), por lo que procederemos a calcular el filtro para MI que usaremos como base para los demás filtros, ya que si cumple las especificaciones para la región entre frecuencias más cercanas, se cumplirá en las demás frecuencias.

Realizamos el cálculo del orden del filtro Butterworth prototipo pasa-bajo. El filtro pasa-banda será el doble del orden calculado para el prototipo pasa-bajos.

Especificaciones

La frecuencia de muestreo se calcula usando el criterio de Nyquist:

$$f_s = 2 f_{Max} [Hz] = 2 * 150 [Hz] = 300 [Hz]$$

Por comodidad tomamos $f_s = 400 [Hz]$

Además:

- $f_c = 84,407 [Hz]$ (Frecuencia de corte)
- $f_a = 90.407 [Hz]$ (Frecuencia de atenuación)
- $A_t = 10 [dB]$ (Atenuación a f_a)
- $f_s = 400 [Hz]$ (Frecuencia de muestreo)

Utilizamos el método directo mediante aproximación Butterworth:

Primero, debemos convertir las frecuencias digitales a analógicas para poder encontrar el orden n del filtro prototipo analógico LP.

$$\omega_a = 2 * f_s * \operatorname{tg}\left(\frac{2 * \pi * f_a}{2 * f_s}\right) = 687,6993 \operatorname{rad/s}$$

$$\omega_c = 2 * f_s * \operatorname{tg}\left(\frac{2 * \pi * f_c}{2 * f_s}\right) = 624,6497 \operatorname{rad/s}$$

Para calcular el filtro, debemos calcular el orden “ n ”. Para ello, utilizaremos la siguiente función:

$$A|_{dB} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right]$$

Al despejar “ n ” se obtiene:

$$n = \frac{1}{2} \frac{\log(10^{\frac{A|_{dB}}{10}} - 1)}{\log\left(\frac{\omega_c}{\omega_a}\right)} = 11,42 \approx 12$$

Dado el alto orden que tiene este filtro, el cálculo analítico de los valores se hace sumamente complejo, debido a este problema procederemos a realizar de manera ilustrativa el cálculo para un filtro de orden 2.

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

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

En efecto, “m” va de “0” a “2n-1” (0 a 3). A través de Matlab, se obtienen los siguientes valores:

- Para $m = 0$ $u = 0,7723$ $v = 2,1847 \rightarrow |Z_0| = 2,3172$
- Para $m = 1$ $u = 0,1438$ $v = 0,4069 \rightarrow |Z_1| = 0,4316$
- Para $m = 2$ $u = 0,1438$ $v = -0,4069 \rightarrow |Z_2| = 0,4255$
- Para $m = 3$ $u = 0,7723$ $v = -2,1847 \rightarrow |Z_3| = 2,3172$

Los polos correspondientes a $m = 1, 2$ se descartan ya que su módulo es menor a 1. Por lo tanto, los polos de nuestra función son los correspondientes a $m=0, 3$:

$$Z_0 = 0,7723 + j 2,1847$$

$$Z_3 = 0,7723 - j 2,1847$$

La función de transferencia del filtro será:

$$H(Z) = \frac{(Z+1)^2}{(z-Z_0)(z-Z_3)}$$

Donde al trabajarlo, obtenemos la siguiente expresión:

$$H(Z^{-1}) = \frac{0,1862 + 0,3725 Z^{-1} + 0,1862 Z^{-2}}{1 - 0,2877 Z^{-1} + 0,1862 Z^{-2}}$$

Para obtener la respuesta en frecuencia de este filtro se debe reemplazar:

$$Z^{-1} = e^{-j\omega T}$$

En donde se obtiene una expresión compleja $H(\omega T)$, de la cual resulta que:

Respuesta en Amplitud:

$$|H(\omega T)| = \sqrt{Re^2 + Img^2}$$

Respuesta de Fase:

$$\varphi(\omega T) = \text{Atg}\left(\frac{\text{Im}g}{\text{Re}}\right)$$

La magnitud y la fase de la respuesta en frecuencia serán graficadas de 0 a π , ya que, para valores más grandes, la gráfica se repite.

Gráfica de magnitud y fase

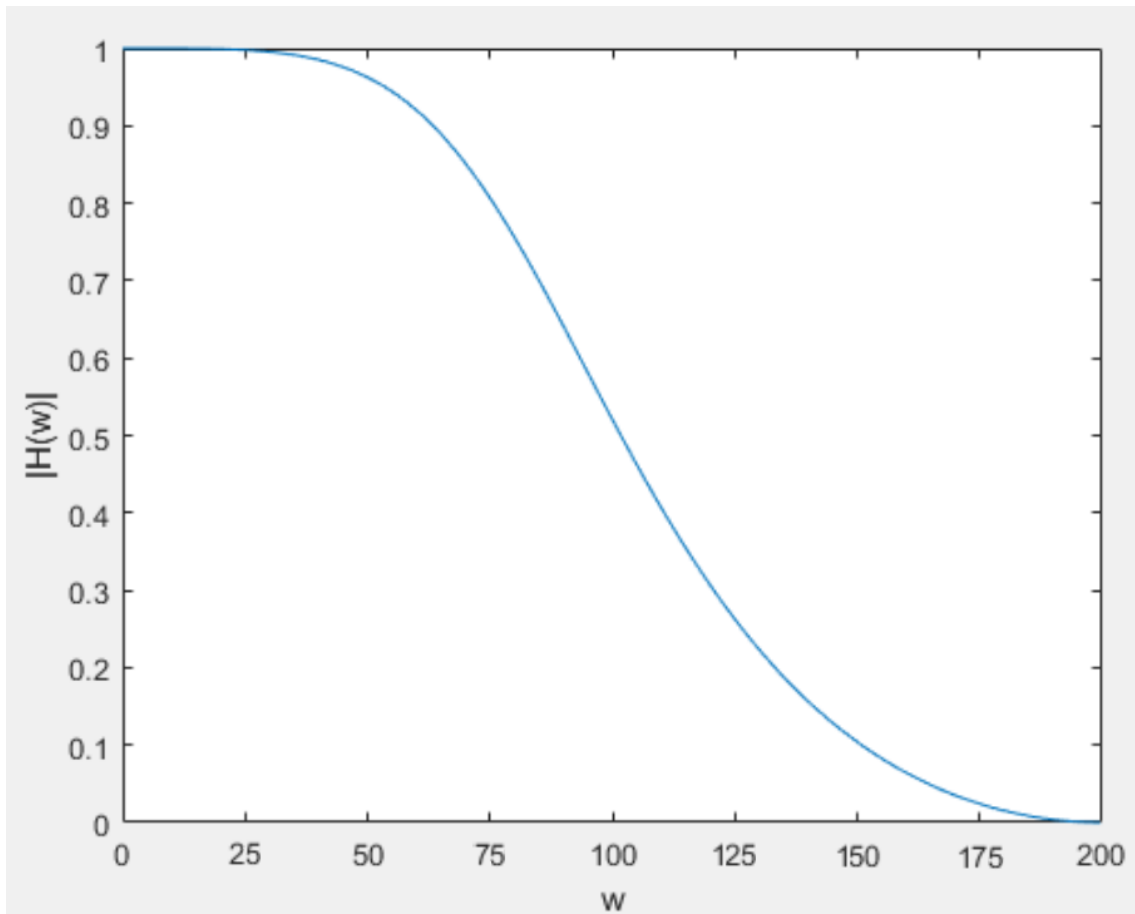


Figura: Gráfica de magnitud.

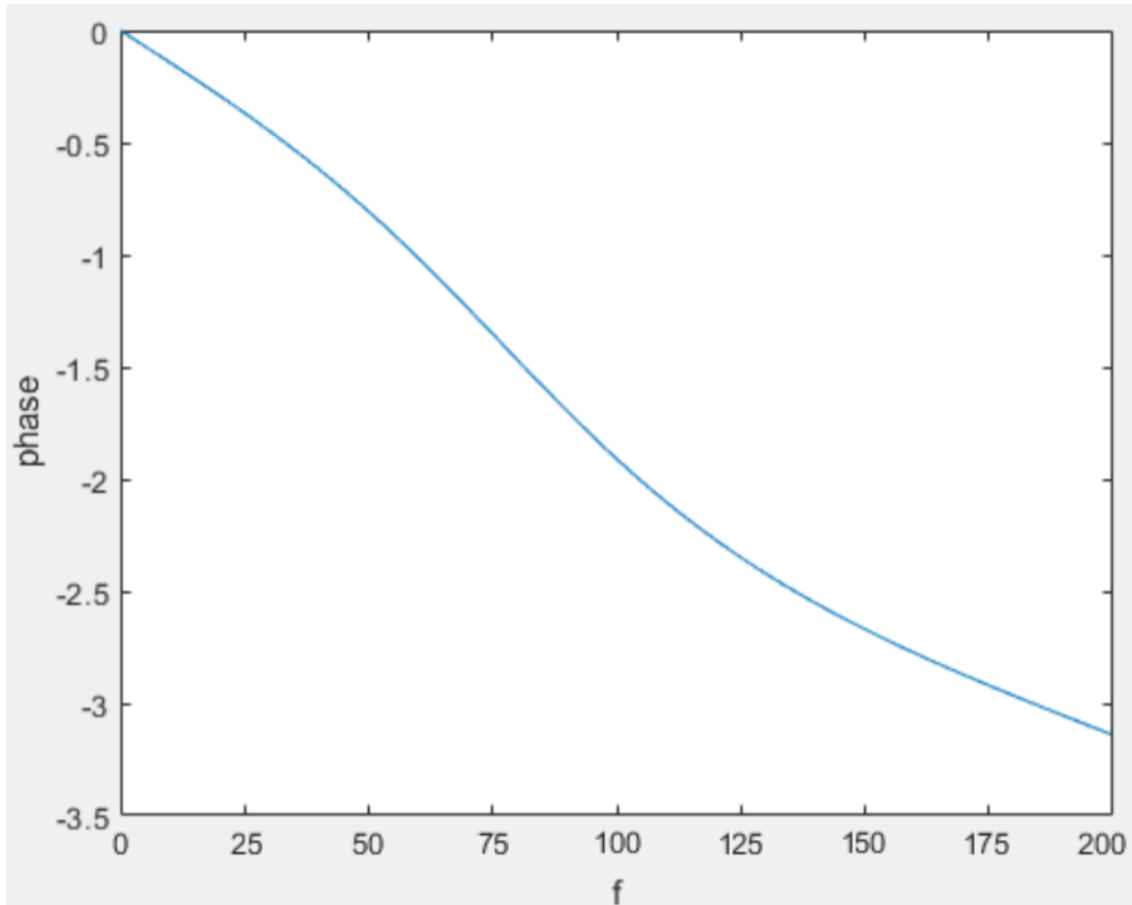


Figura: Gráfica de fase.

Se trata de un filtro pasa-bajo. Se debe realizar la transformación espectral para obtener el filtro pasabanda correspondiente. Esta transformación requiere la siguiente sustitución:

$$z^{-1} \rightarrow h(z^{-1}) = -\frac{\frac{K-1}{K+1} - 2\alpha \frac{K}{K+1} z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2\alpha \frac{K}{K+1} z^{-1} + \frac{K-1}{K+1} z^{-2}}$$

Los parámetros K y α están definidos por las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{\cos\left(\frac{\omega_{c2} + \omega_{c1}}{2} T\right)}{\cos\left(\frac{\omega_{c2} - \omega_{c1}}{2} T\right)} \quad K = \cot\left(\frac{\omega_{c2} - \omega_{c1}}{2} T\right) \tan\left(\frac{\omega_c T}{2}\right)$$

Donde:

- $\omega_c = 2 * \pi * 82,407 = 517,7784 \text{ rad/s}$
- $\omega_{c1} = 2 * \pi * 80,407 = 505,2121 \text{ rad/s}$
- $\omega_{c2} = 2 * \pi * 84,407 = 530,3448 \text{ rad/s}$
- $f_s = 400 \text{ HZ}$

$$\alpha = 0.2730 \text{ y } K = 24,0507$$

Obtenemos h:

$$h(Z^{-1}) = \frac{-0,9202 + 0,5242 Z^{-1} - Z^{-2}}{1 - 0,5242 Z^{-1} + 0,9202 Z^{-2}}$$

Reemplazamos en:

$$H(Z^{-1}) = \frac{0,1862 + 0,3725 Z^{-1} + 0,1862 Z^{-2}}{1 - 0,2877 Z^{-1} + 0,1862 Z^{-2}}$$

Reemplazando la expresión en la ecuación H, se obtiene el filtro pasa-banda requerido:

$$H(Z^{-1}) = \frac{0,1556 - 0,1758 Z^{-1} + 0,3835 Z^{-2} - 0,1912 Z^{-3} + 0,1836 Z^{-4}}{1 - 1,0385 Z^{-1} + 2,0732 Z^{-2} - 0,9329 Z^{-3} + 0,8067 Z^{-4}}$$

Gráfica de magnitud y fase

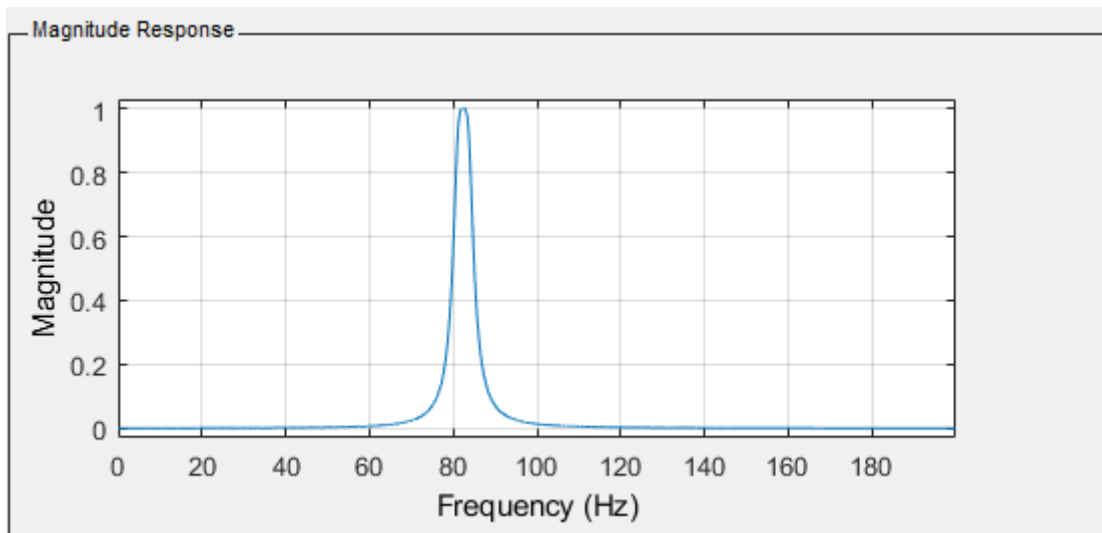


Figura: Respuesta de magnitud.

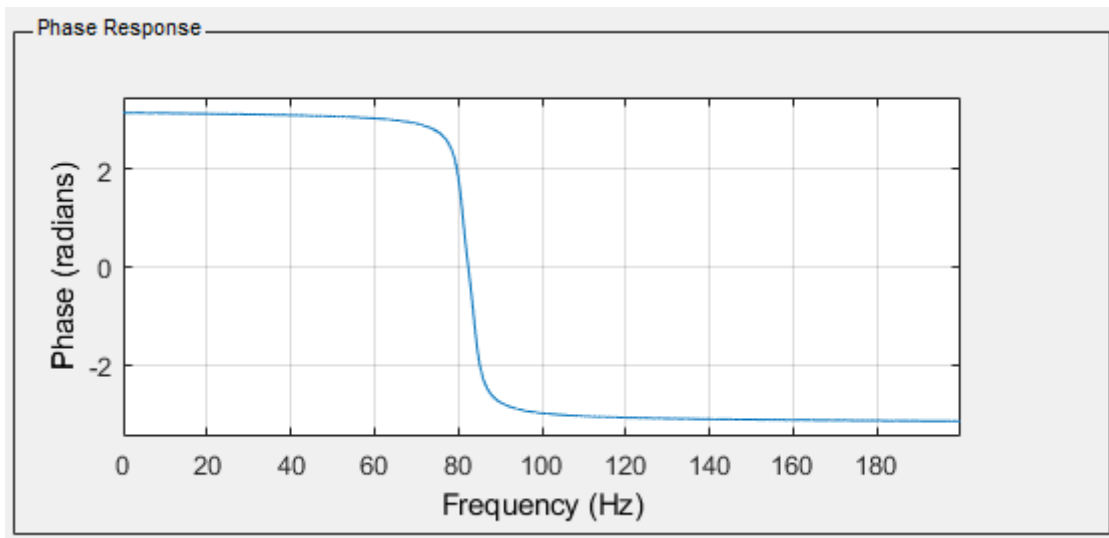


Figura: Respuesta de fase.

Realización canónica

A continuación, se presenta la realización canónica del filtro pasa-banda.

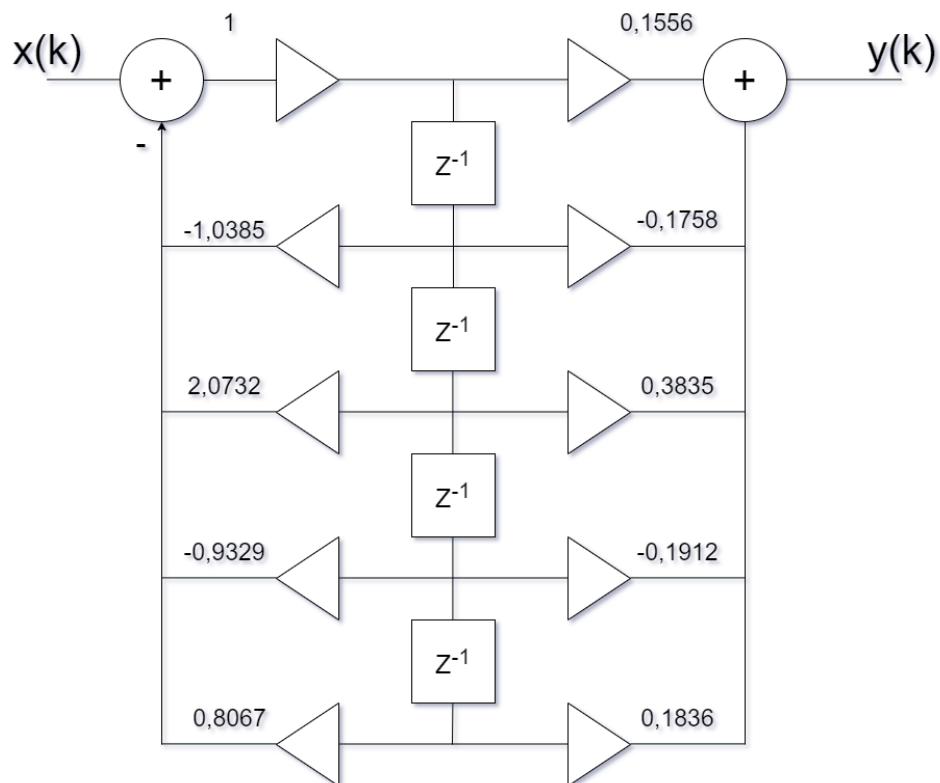


Figura: Realización canónica filtro pasabanda.

Amplitud, fase y frecuencia

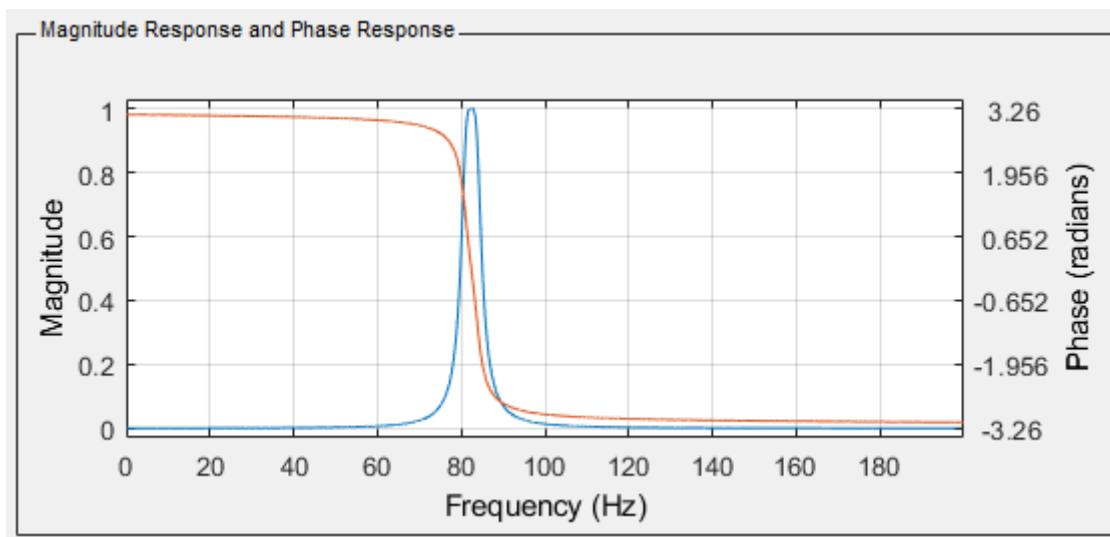


Figura: Amplitud y fase vs frecuencia.

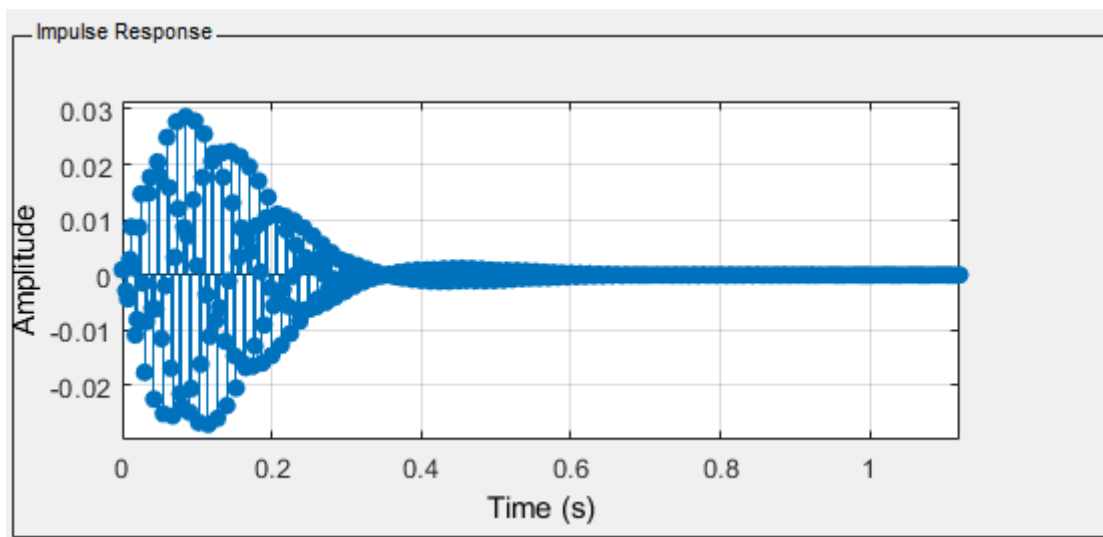


Figura: Respuesta al impulso.

Transformada rápida de Fourier (FFT)

Para obtener las curvas, creamos una función en MATLAB, donde se cargan los valores de los coeficientes del numerador y el denominador para obtener las curvas.

Para ello, necesitamos:

- Coeficientes del numerador y denominador
- Frecuencia de muestreo.
- Construcción del vector de frecuencias.
- Número de elementos del vector que rellenamos con cero desde la segunda posición hasta el final de manera que el largo de la FFT sea N.
- Finalmente obtenemos la FFT gracias a la función filter.

FFT para N = 16

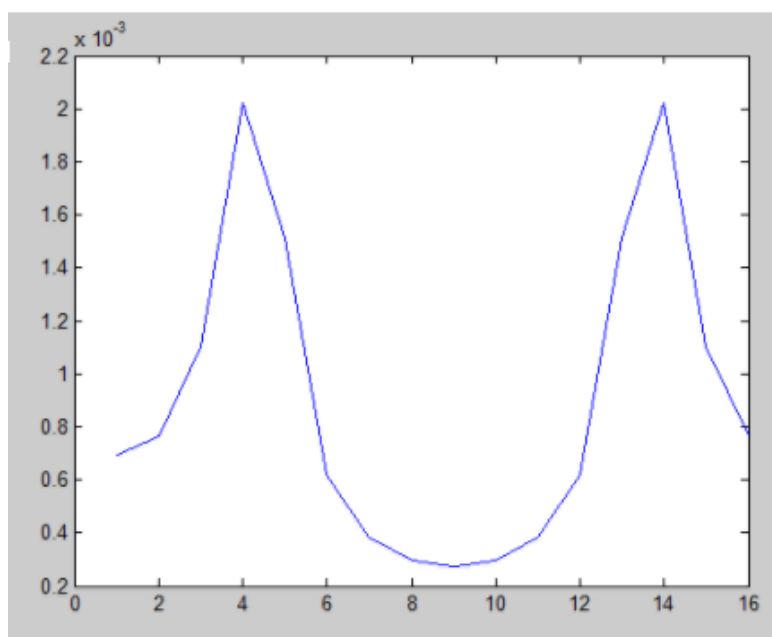


Figura: FFT para N = 16

FFT para $N = 32$

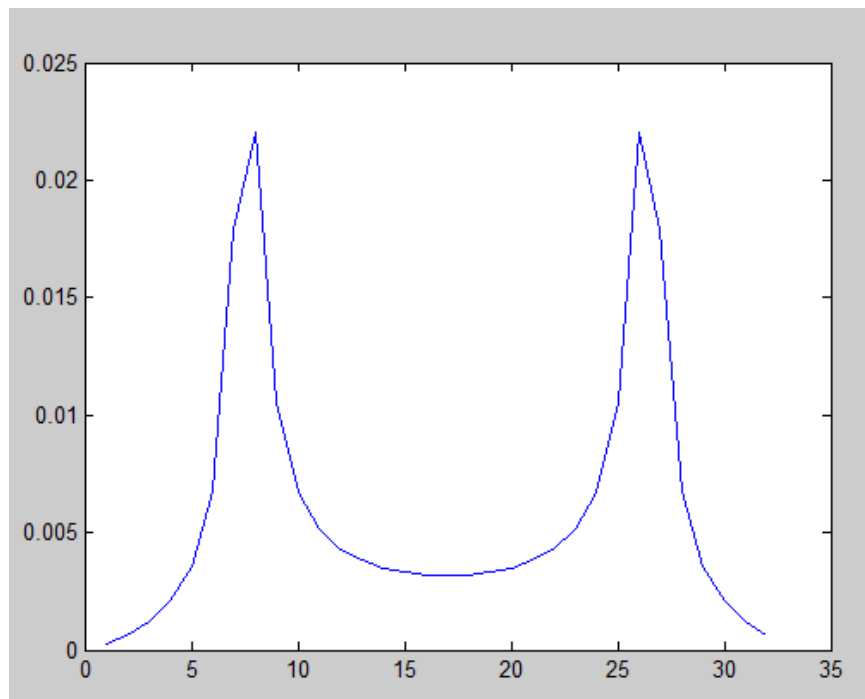


Figura: FFT para $N = 32$

FFT para $N = 64$

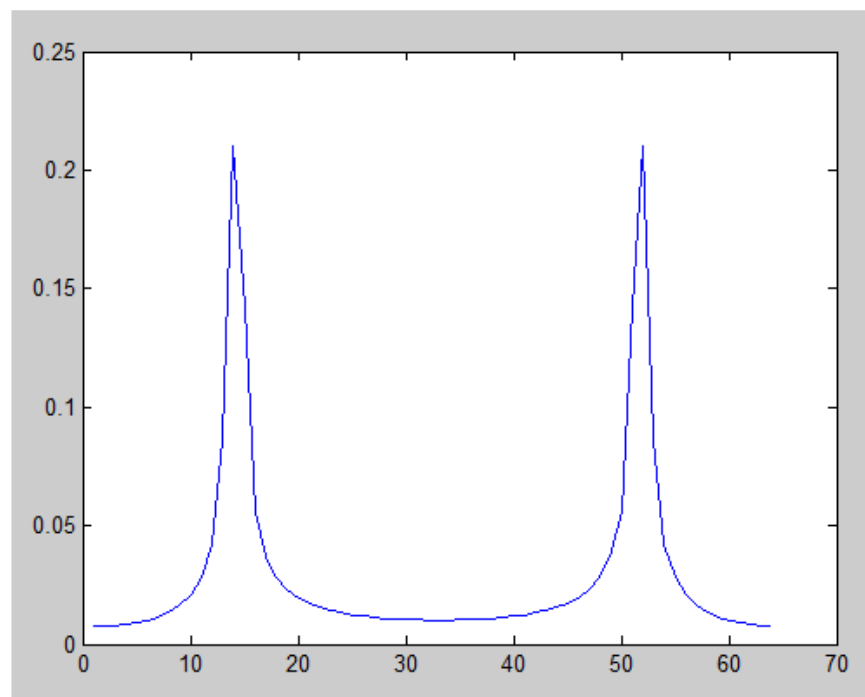


Figura: FFT para $N = 64$

Podemos observar que a medida que mayor es el número de muestras tomadas (N más grande), la gráfica posee mayor definición, asemejándose a la respuesta en amplitud de la señal.

Matlab y fdatool

Se utilizara a Matlab fdatool para obtener los 7 filtros correspondientes a cada nota, minimizando el orden. Obtendremos primero el orden del filtro MI, ya que es el más crítico. Luego usaremos el mismo orden para el resto de los filtros.

Nota MI

Ingresamos al fdatool con los siguientes valores correspondientes a la nota “MI”, con las especificaciones que también se indicarán abajo:

$$f_{stop1} = 78,407[Hz] \quad f_{pass1} = 80,407[Hz]$$

$$f_{pass2} = 84,407[Hz] \quad f_{stop2} = 86,407[Hz]$$

$$f_{sample} = 400[Hz]$$

$$At_{stop1} = At_{stop2} = 10[dB]$$

$$At_{pass} = 3[dB]$$

Las gráficas de magnitud, fase y diagrama de polos y ceros son las siguientes:

Magnitud y fase

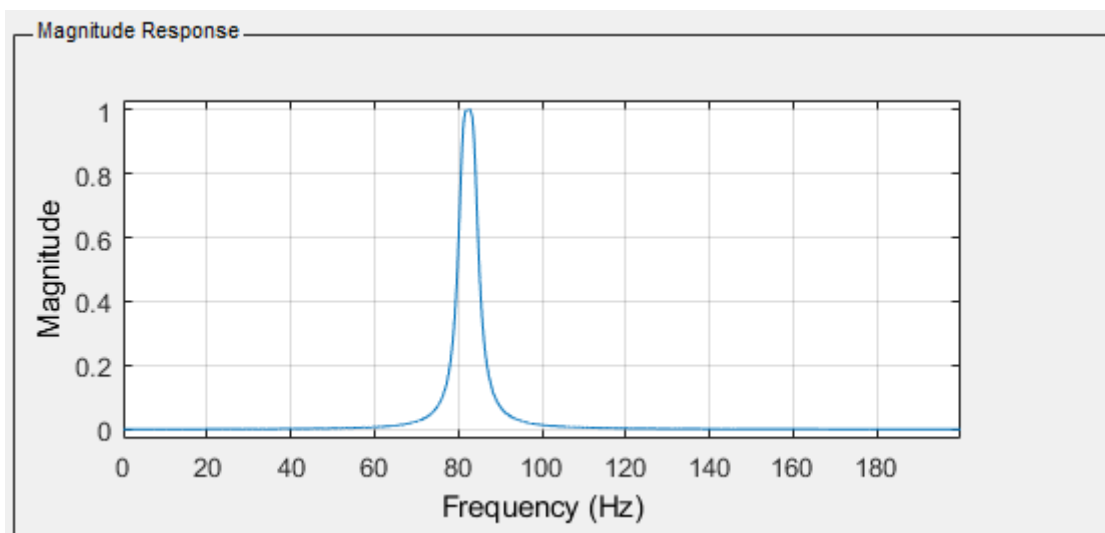


Figura: Respuesta en magnitud nota MI.

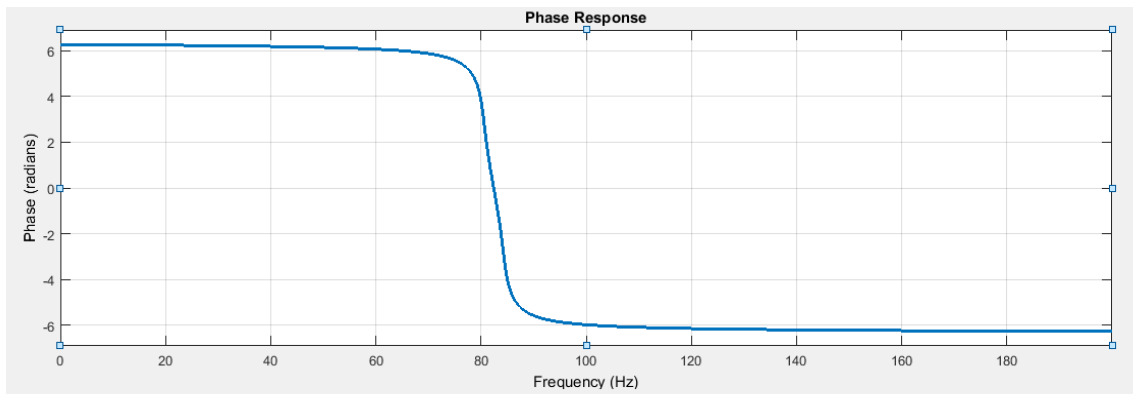


Figura: Respuesta en fase nota MI.

Diagrama de polos y ceros

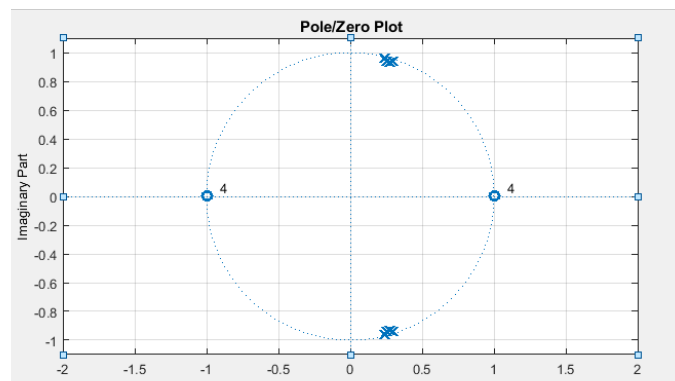


Figura: Diagrama de polos y ceros nota MI.

Respuesta al impulso

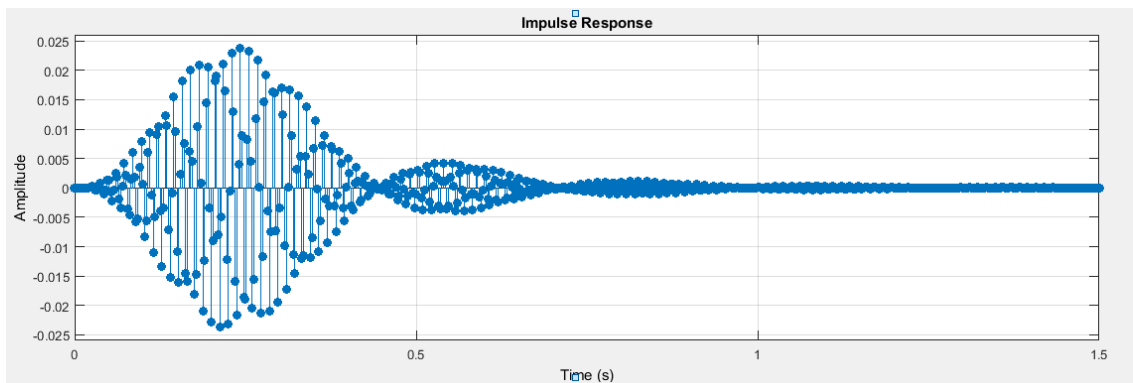


Figura: Respuesta al impulso nota MI.

Esquema de realización

Se muestra el esquema de realización del filtro MI. Solo mostraremos una sección del filtro, ya que cada filtro se forma por 4 secciones idénticas, cambiando solo la ganancia de los multiplicadores que serán detallados más adelante.

Las tablas muestran los coeficientes correspondientes a los denominadores de las funciones transferencia de cada sección. No incluimos los valores del numerador ya que es idéntico para todas las secciones. Se puede ver en el circuito de abajo su numerador de la forma: $N(z - 1) = 1 - z - 2$

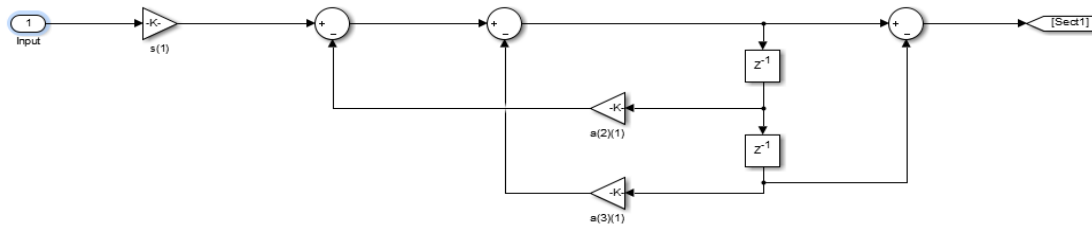


Figura: Esquema de realización nota MI.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes de filtro nota MI.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.030771540537524007	0.030771540537524007	0.030771540537524007	0.030771540537524007
a2	-0.49187653392864366	-0.57577663355566466	-0.55303523352389927	-0.50791682322889398
a3	0.956224592182868815	0.956761966292166254	0.94373302475617737	0.94335822860296126

Nota DO

Para el filtro DO se utiliza la misma característica de atenuación, ajustando las frecuencias de paso y atenuación. Se puede observar que se sigue obteniendo un orden 4 para su diseño. Además, se reducen a 2 las frecuencias correspondientes a la nota solicitada, manteniendo la frecuencia de muestra.

$$f_{stop1} = 61.406[Hz] \quad f_{pass1} = 63.406[Hz]$$

$$f_{pass2} = 67.406[Hz] \quad f_{stop2} = 69.406[Hz]$$

Magnitud y fase

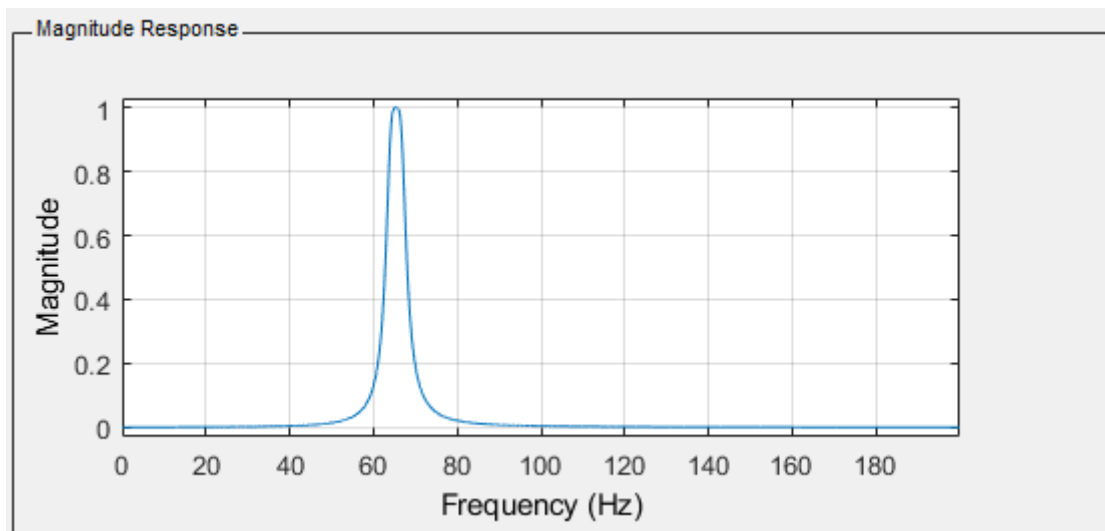


Figura: Respuesta en magnitud nota DO.

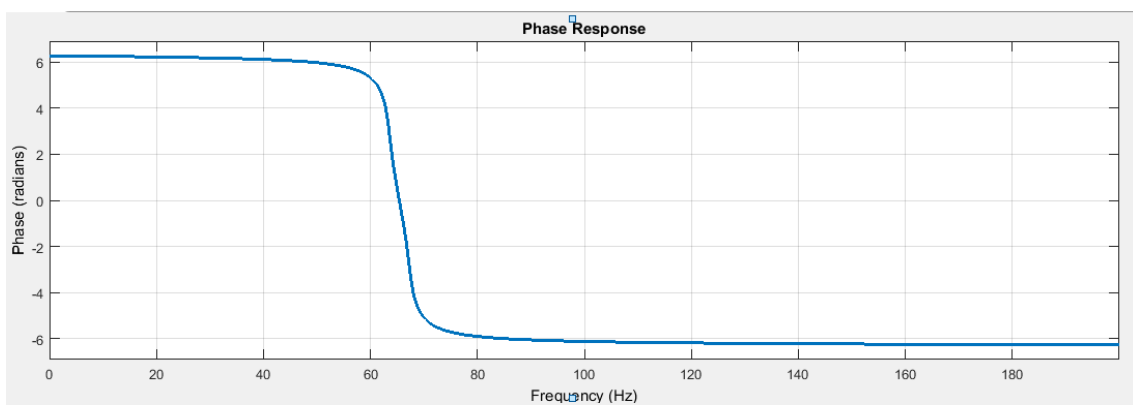


Figura: Respuesta en fase nota DO.

Diagrama de polos y ceros

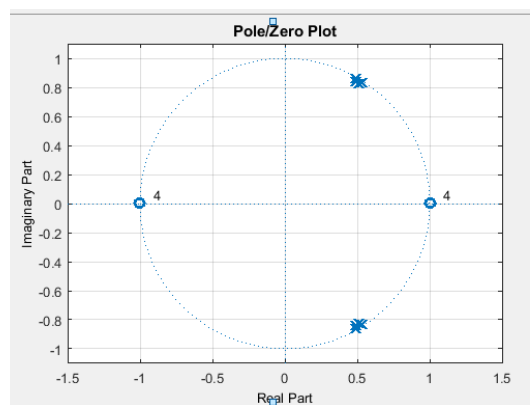


Figura: Diagrama de polos y ceros nota DO.

Respuesta al impulso

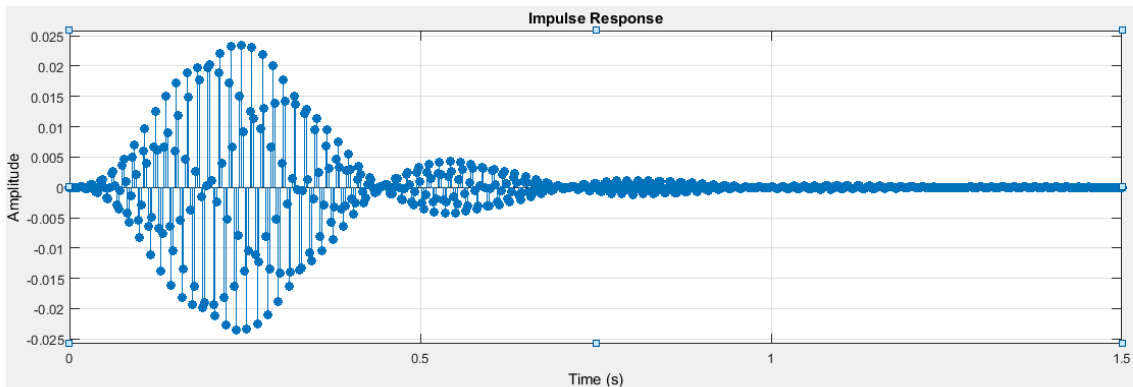


Figura: Respuesta al impulso nota DO.

Para la realización circuital del filtro DO, hay que tener en cuenta que cada uno de los 7 filtros son idénticos ya que todos fueron diseñados a partir del filtro MI. Por esta razón, mostraremos los multiplicadores correspondientes.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes nota DO.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.030771540537524122	0.030771540537524122	0.030771540537524122	0.030771540537524122
a2	-0.97406056792408013	-1.04916902733538819	-1.0254976247812322	-0.98503319716305071
a3	0.955921048005878848	0.957065777495233582	0.94394493301248961	0.94314645205719305

Nota RE

$$f_{stop1} = 69.416[Hz]$$

$$f_{pass1} = 71.416[Hz]$$

$$f_{pass2} = 75.416[Hz]$$

$$f_{stop2} = 77.416[Hz]$$

Magnitud y fase

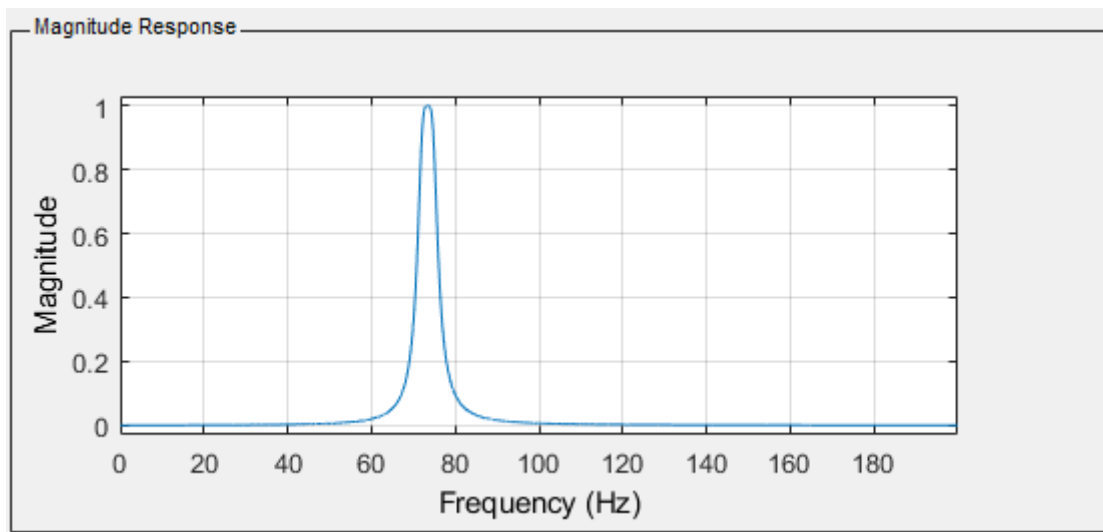


Figura: Respuesta en magnitud nota RE.

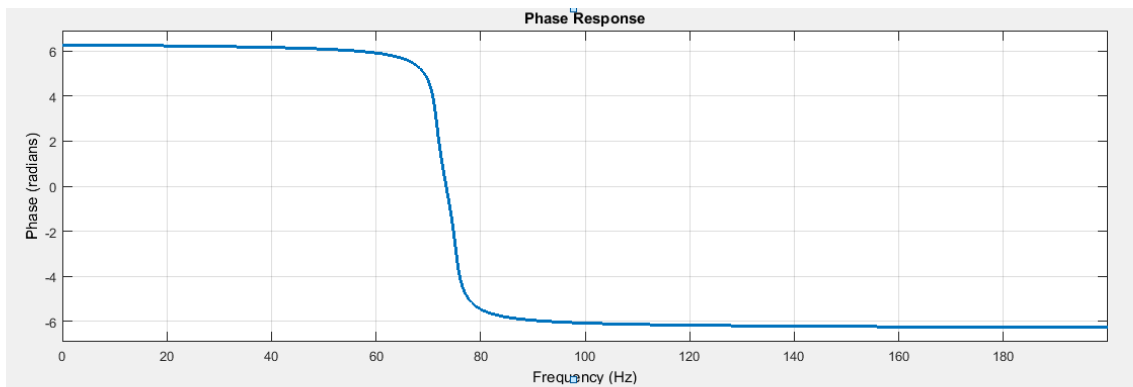


Figura: Respuesta en fase nota RE.

Diagramas de polos y ceros

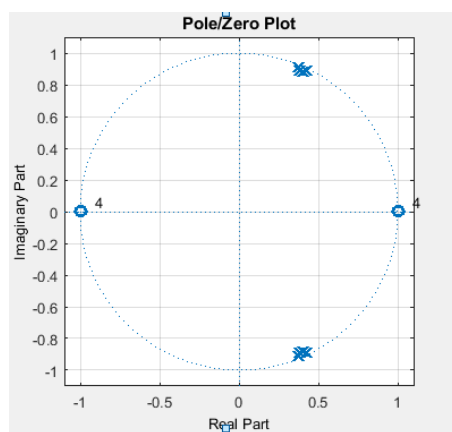


Figura: Diagramas de polos y ceros nota RE.

Respuesta al impulso

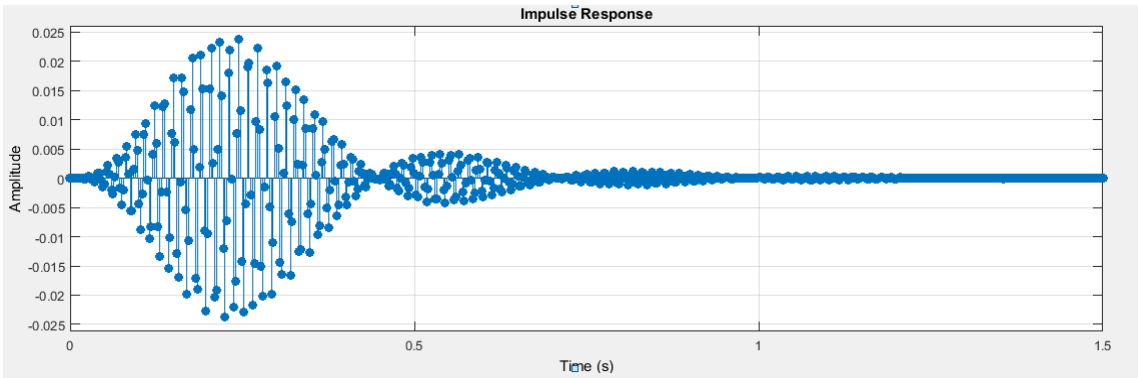


Figura: Respuesta al impulso nota RE.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes de filtro nota RE.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.031058241153059947	0.031058241153059947	0.030555110627236107	0.030555110627236107
a2	-0.8537747149498589	-0.74860780218302314	-0.80998744023972136	-0.76697870914594346
a3	0.97654179993298595	0.97593644899972687	0.94383884737865009	0.94325245986716233

Nota FA

$f_{stop1} = 83.307[Hz]$
 $f_{pass1} = 85.307[Hz]$

$f_{pass2} = 89.307[Hz]$
 $f_{stop2} = 91.307[Hz]$

Magnitud y Fase

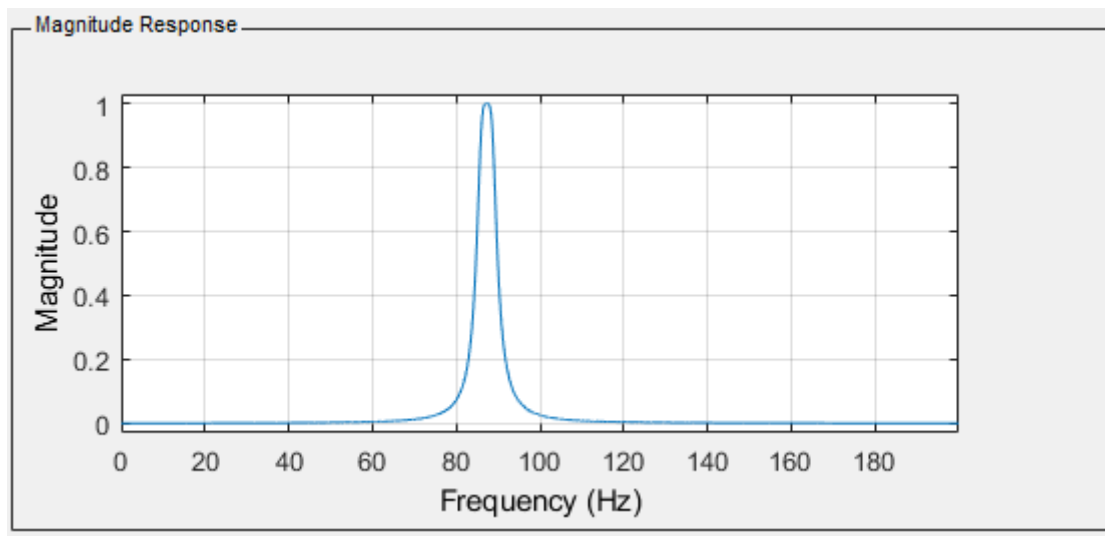


Figura: Respuesta en magnitud nota FA.

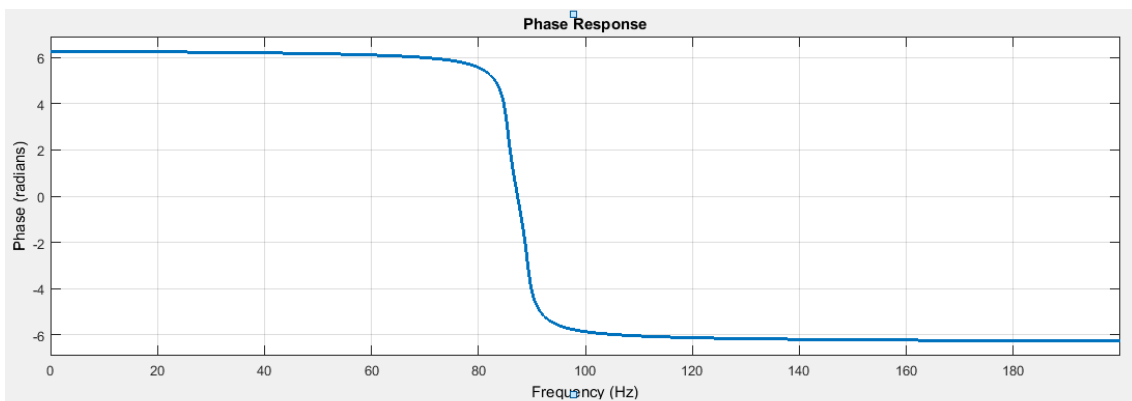


Figura: Respuesta en frecuencia nota FA.

Diagrama de polos y ceros

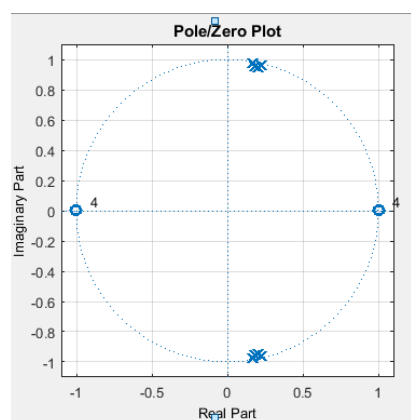


Figura: Diagrama de polos y ceros nota FA.

Respuesta al impulso

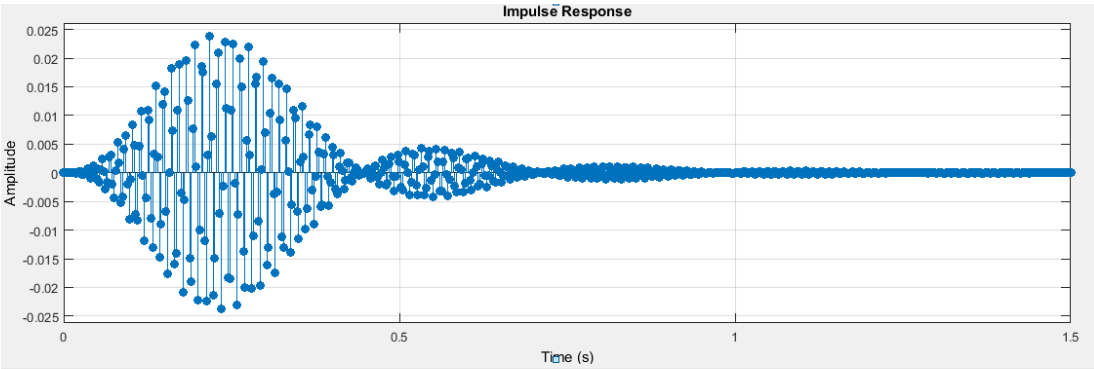


Figura: Respuesta al impulso nota FA.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes de filtro nota FA.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.031058241153059975	0.031058241153059975	0.030555110627236134	0.030555110627236134
a2	-0.44756894888482879	-0.3350037224360165	-0.40803861616821285	-0.36212119206248794
a3	0.97637693410646154	0.97610124044827284	0.94367913152775795	0.94341210350470872

Nota SOL

$$f_{stop1} = 93.999[Hz] \qquad f_{pass1} = 95.999[Hz]$$

$$f_{pass2} = 99.999[Hz] \qquad f_{stop2} = 101.999[Hz]$$

Magnitud y Fase

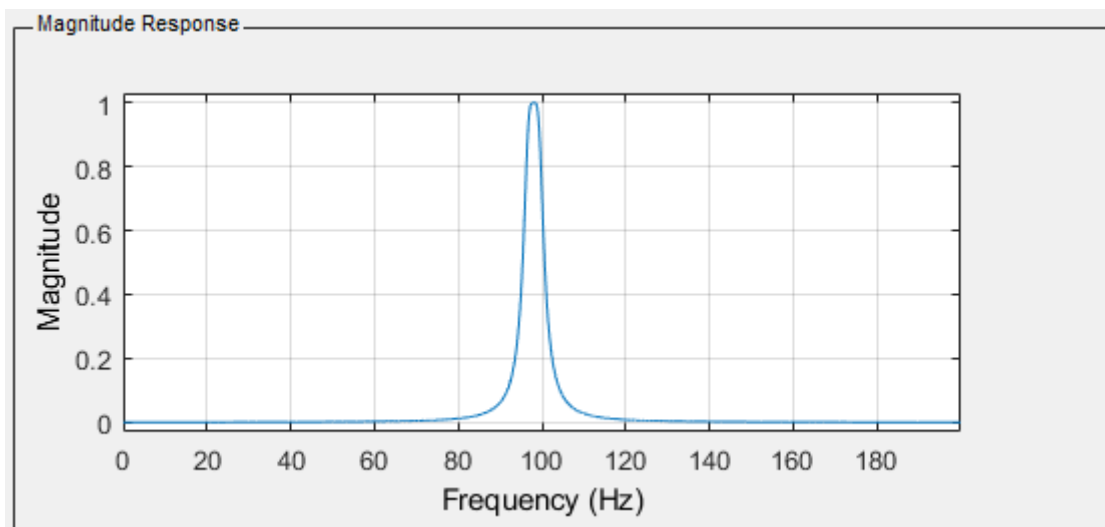


Figura: Respuesta en magnitud nota SOL.

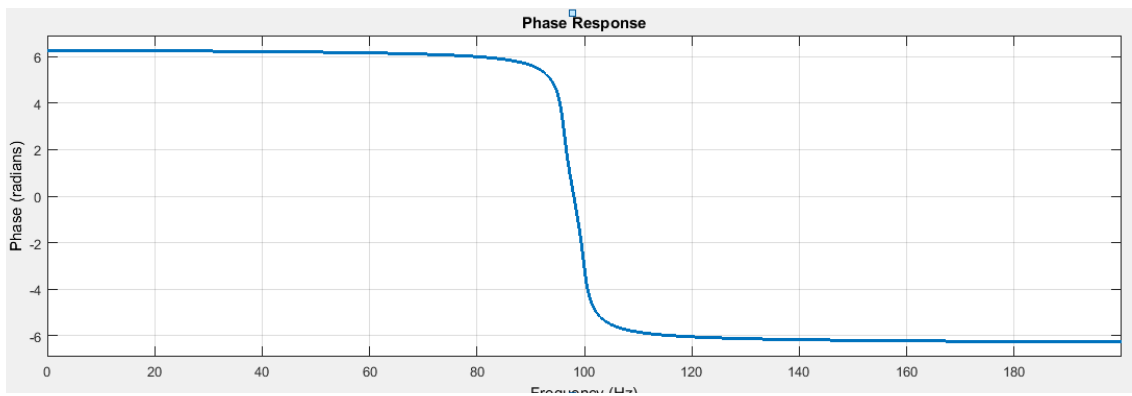


Figura: Respuesta en frecuencia nota SOL.

Diagrama de polos y ceros

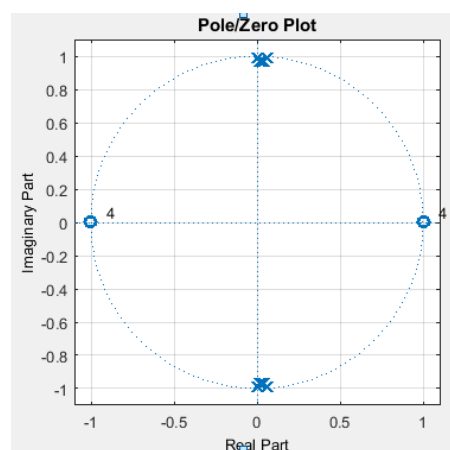


Figura: Diagrama de polos y ceros nota SOL.

Respuesta al impulso

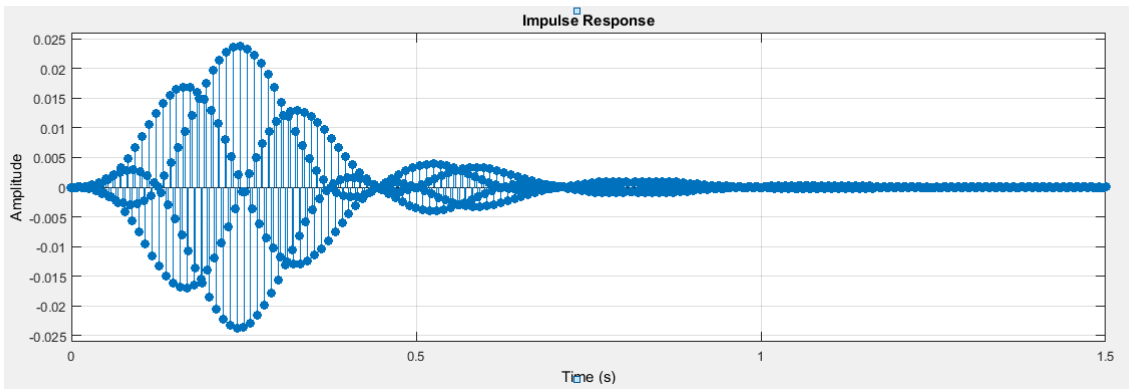


Figura: Respuesta al impulso nota SOL.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes de filtro nota SOL.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.031058241153059989	0.031058241153059989	0.030555110627236148	0.030555110627236148
a2	-0.11944969923387616	-0.0047204502032680562	-0.084485145262869099	-0.037715465598073983
a3	0.97626052699337229	0.97621762856839023	0.94356638273769344	0.94352483385961217

Nota LA

$$\begin{aligned} f_{stop1} &= 106[Hz] & f_{pass1} &= 108[Hz] \\ f_{pass2} &= 112[Hz] & f_{stop2} &= 114[Hz] \end{aligned}$$

Magnitud y Fase

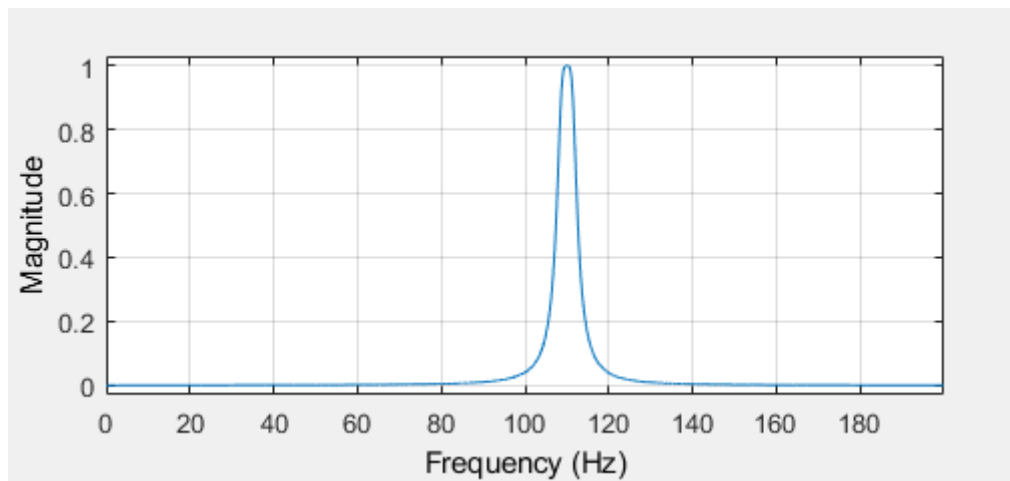


Figura: Respuesta en magnitud nota LA.

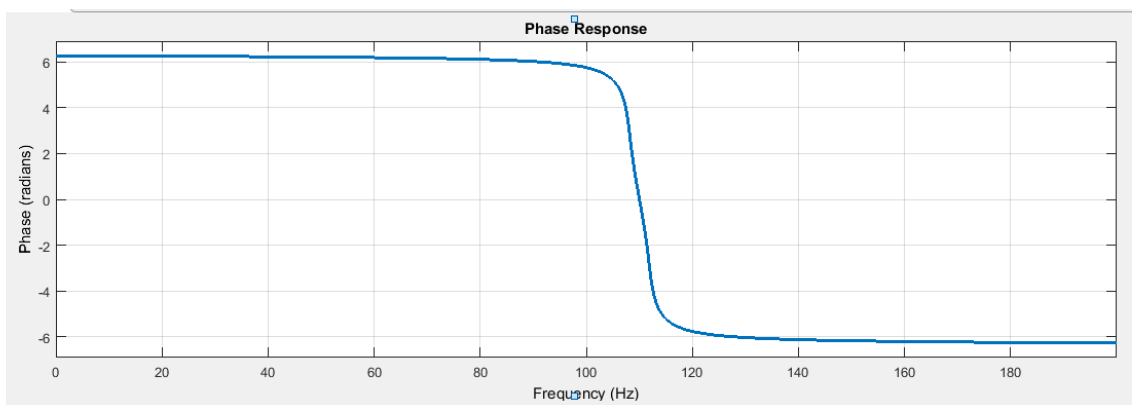


Figura: Respuesta en frecuencia nota LA.

Diagrama de polos y ceros

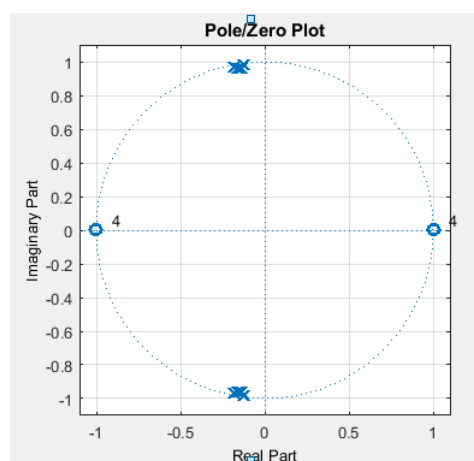


Figura: Diagrama de polos y ceros nota LA.

Respuesta al impulso

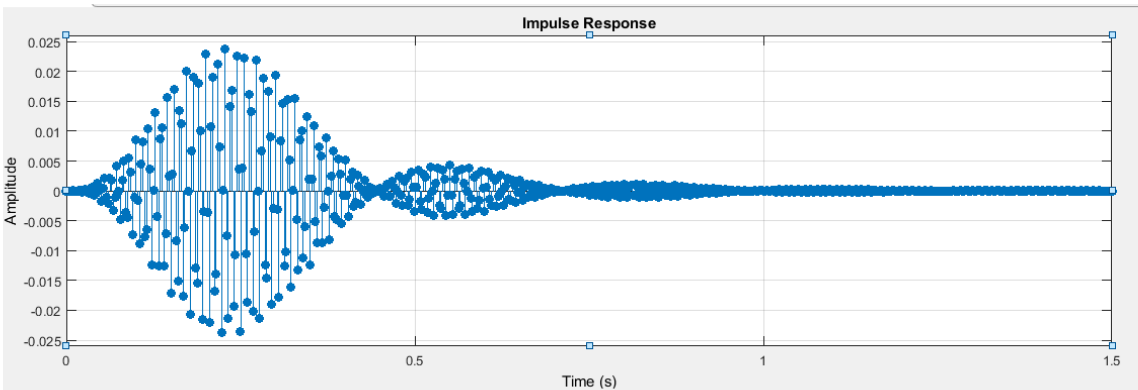


Figura: Respuesta al impulso nota LA.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes de filtro nota LA.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.031058241153059989	0.031058241153059989	0.030555110627236148	0.030555110627236148
a2	0.36574936260821367	0.25234415928765702	0.32726886120352106	0.28102070184562877
a3	0.97634713118159522	0.97613103586734362	0.9436502642107556	0.94344096353610785

Nota SI

$$\begin{aligned} f_{stop1} &= 119.471[Hz] & f_{pass1} &= 121.471[Hz] \\ f_{pass2} &= 125.471[Hz] & f_{stop2} &= 127.471[Hz] \end{aligned}$$

Magnitud y Fase

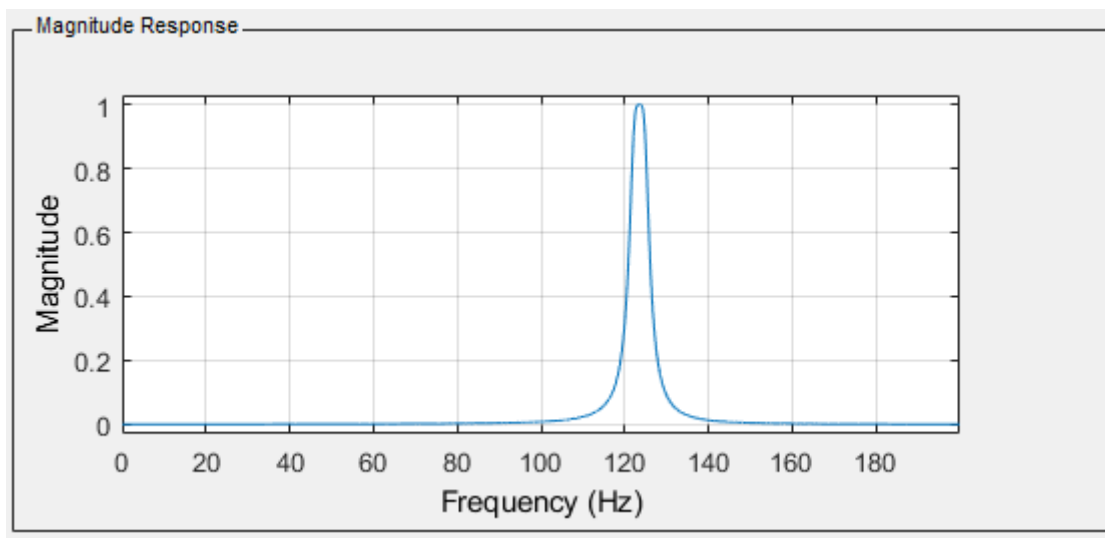


Figura: Respuesta en magnitud nota SI.

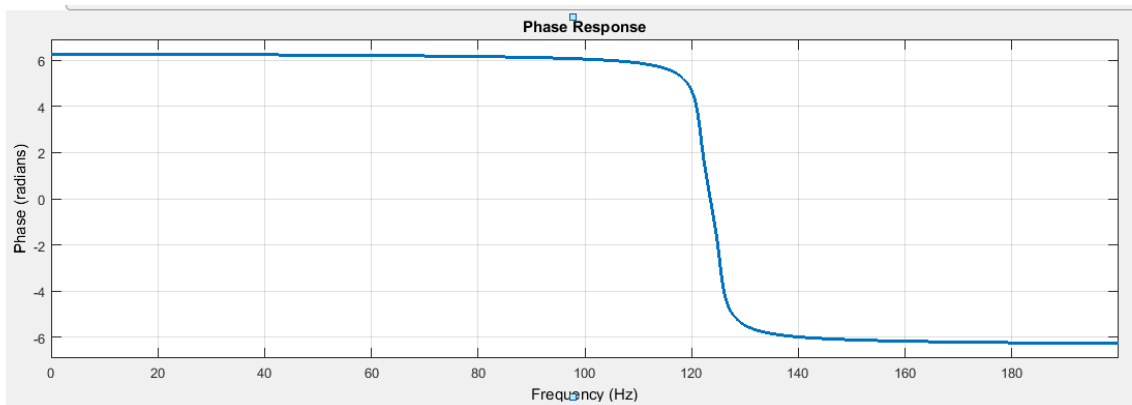


Figura: Respuesta en fase nota SI.

Diagrama de polos y ceros

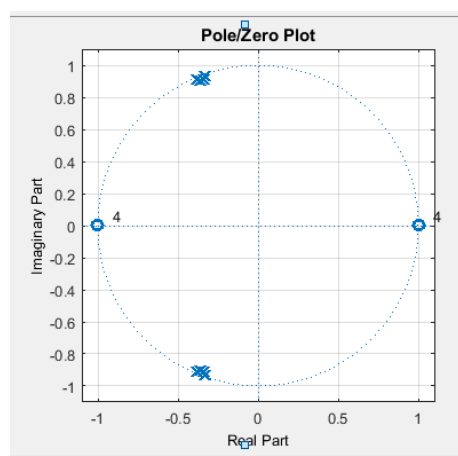


Figura: Diagrama de polos y ceros nota SI.

Respuesta al impulso

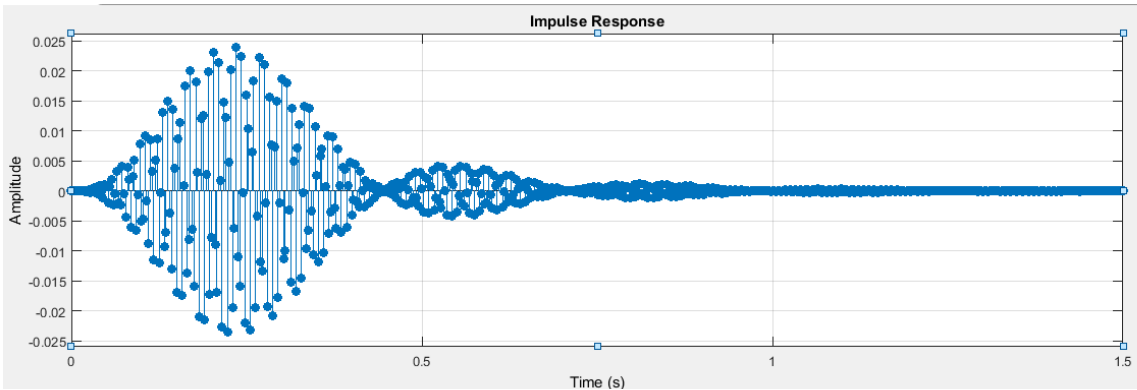


Figura: Respuesta al impulso nota SI.

Coeficientes

Tabla: Coeficientes de filtro nota SI.

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
s	0.031058241153059996	0.031058241153059996	0.030555110627236155	0.030555110627236155
a2	0.76559724573378518	0.6583358803858268	0.722589295766217	0.67875795738365063
a3	0.97650267851397476	0.97597554773400752	0.94380094295833517	0.94329034225959807

Comparación

A continuación, superponemos la respuesta en amplitud y fase de los 7 filtros en un mismo gráfico. Podemos observar que no existe un solapamiento por encima de 0.707, por lo que el diseño del sistema de filtros es correcto.

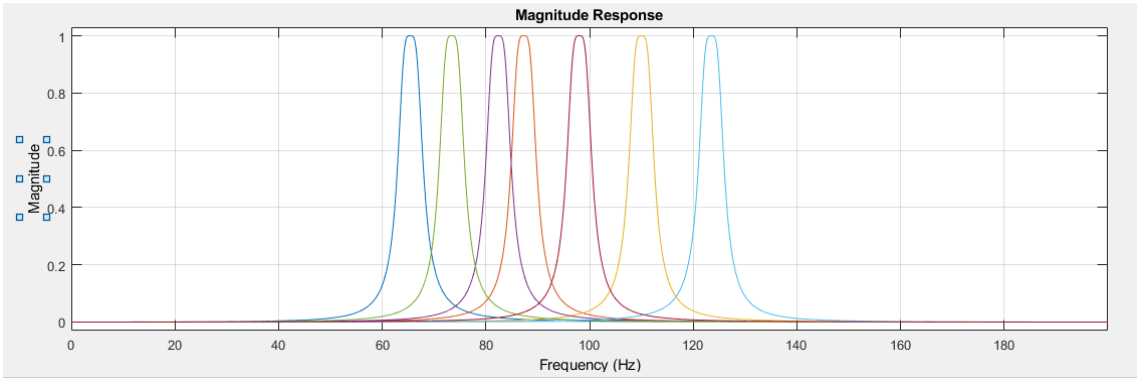


Figura: Respuesta en magnitud de los 7 filtros.

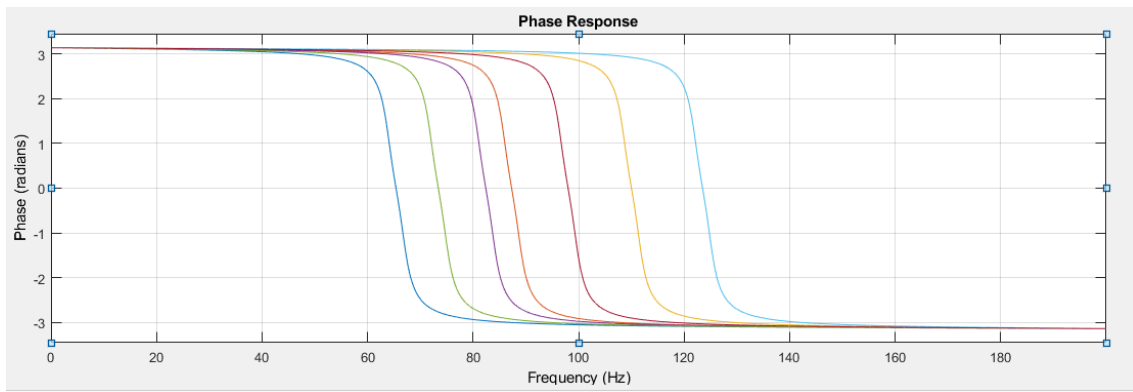


Figura: Respuesta en fase de los 7 filtros.

Simulaciones con Simulink

Se obtiene la simulación del banco de filtros a partir del siguiente esquema formado por un generador senoidal discretizado de frecuencia variable, los 7 filtros diseñados y un osciloscopio de 8 canales para ver la entrada y salida de cada uno.

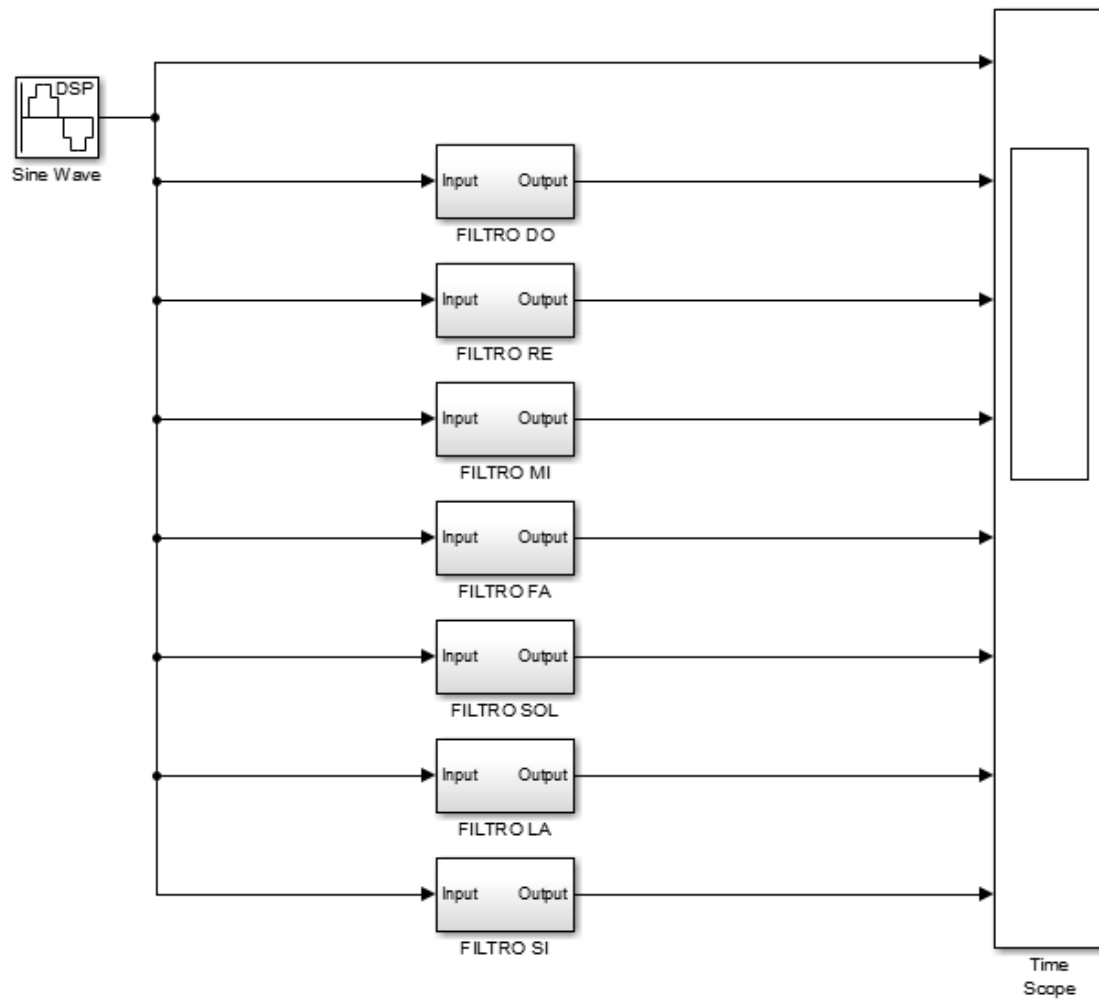


Figura: Esquema de simulación

Nota DO: $f = 65,406$ Hz

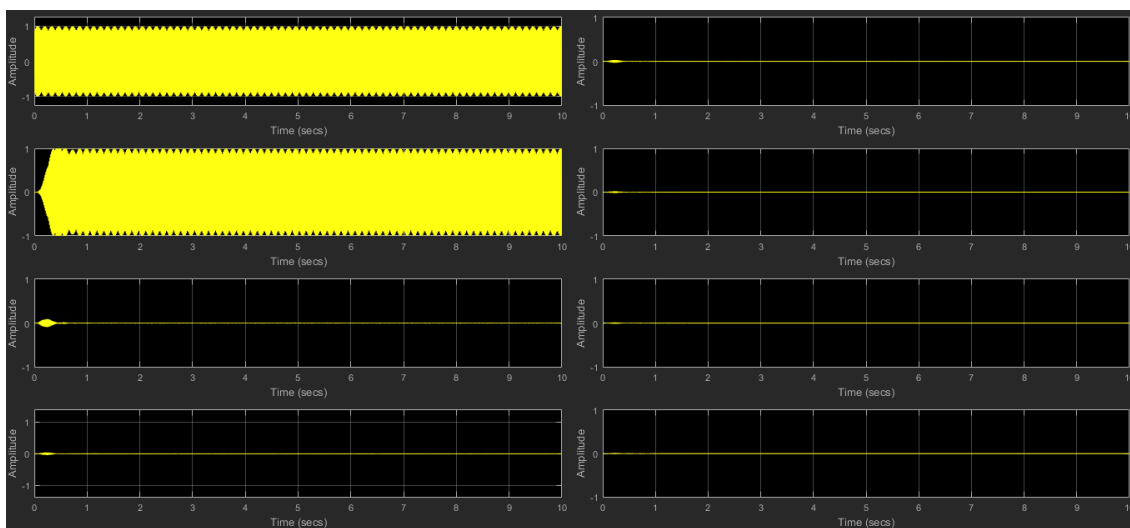


Figura: Simulación nota DO.

Nota RE: $f = 73,416$ Hz

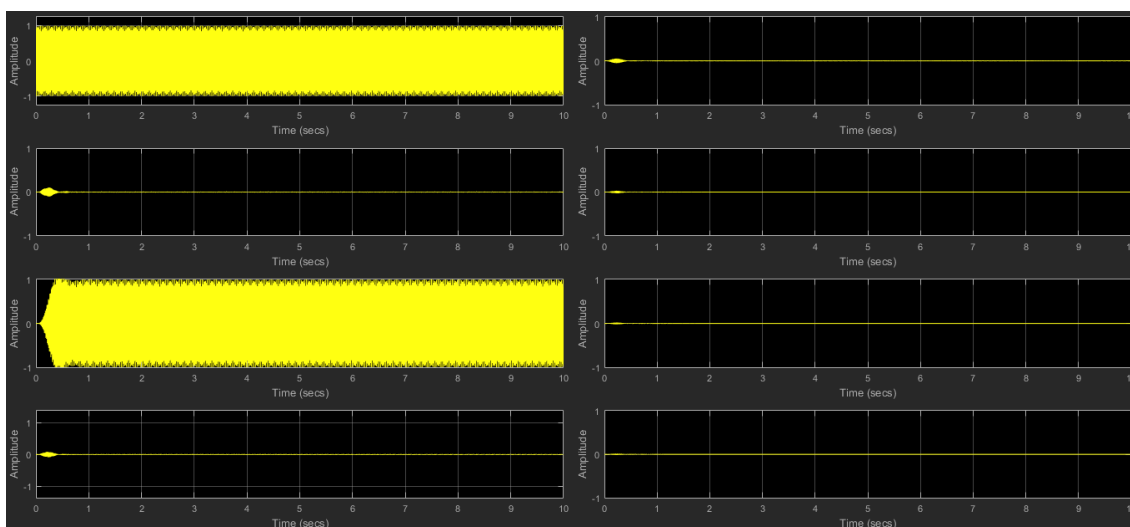


Figura: Simulación nota RE.

Nota MI: $f = 82,407 \text{ Hz}$

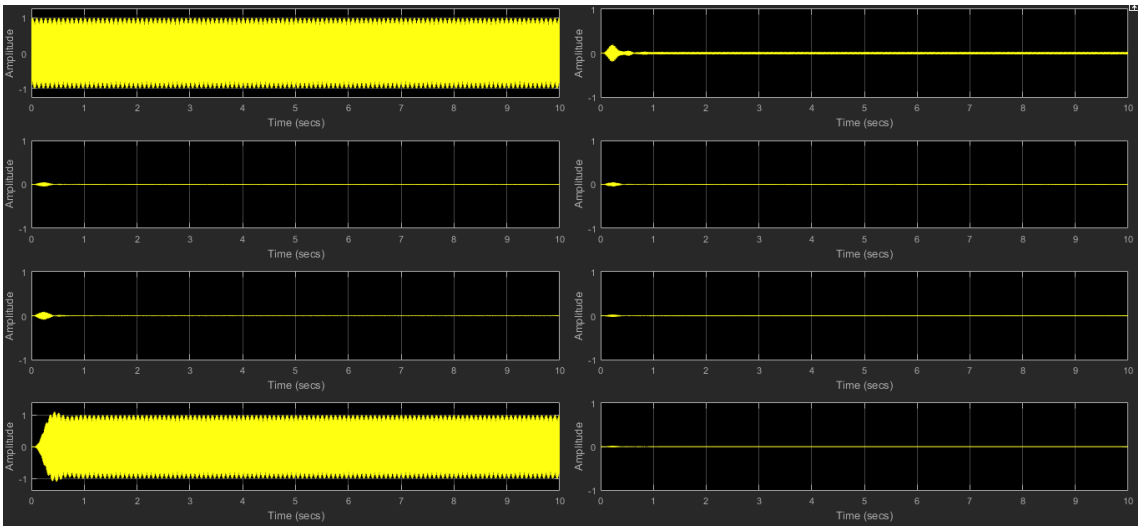


Figura: Simulación nota MI.

Nota FA: $f = 87,307 \text{ Hz}$

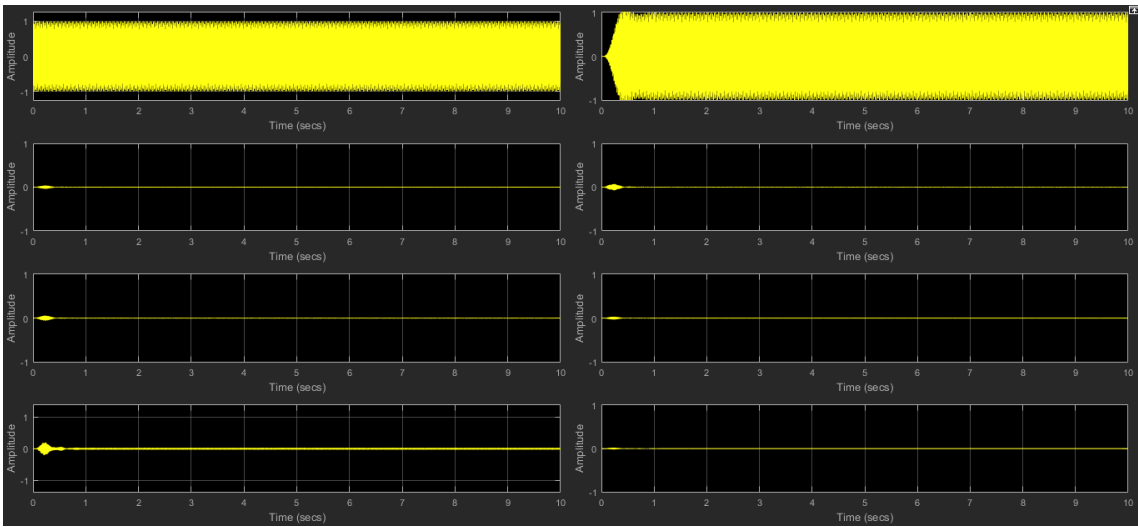


Figura: Simulación nota FA.

Nota SOL: $f = 97,999 \text{ Hz}$

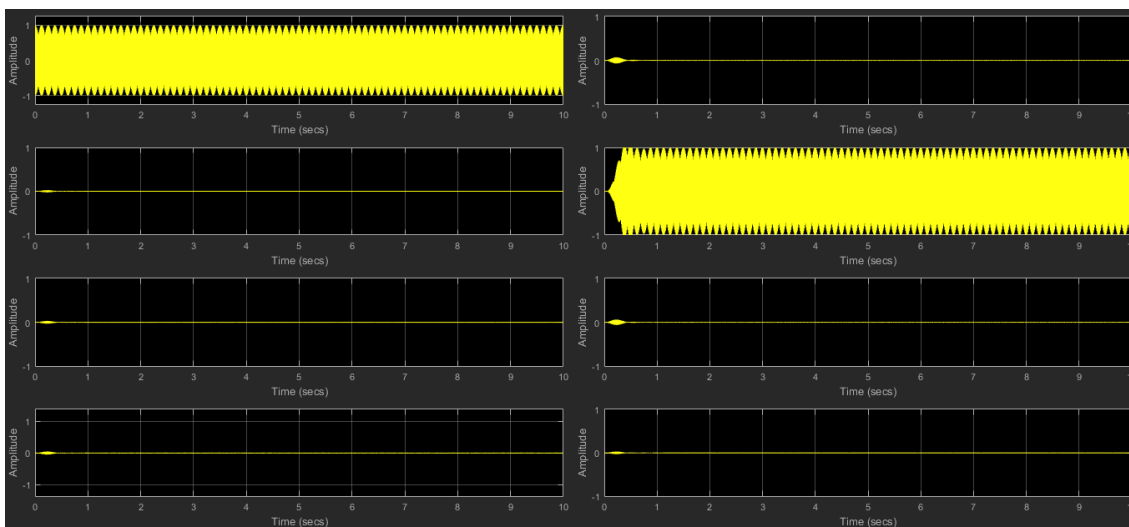


Figura: Simulación nota SOL.

Nota LA: $f = 110 \text{ Hz}$

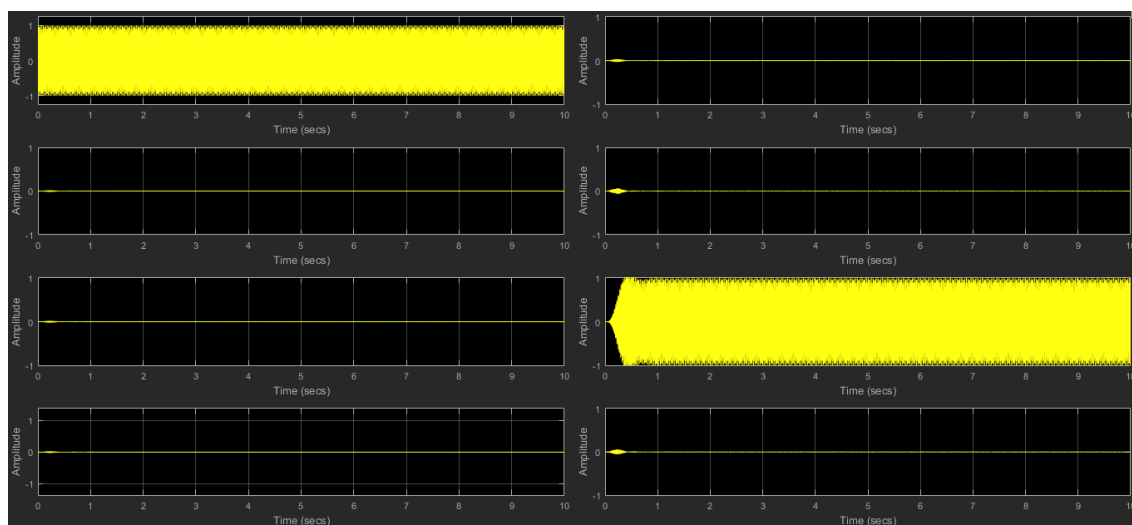


Figura: Simulación nota LA.

Nota SI: $f = 123,471 \text{ Hz}$

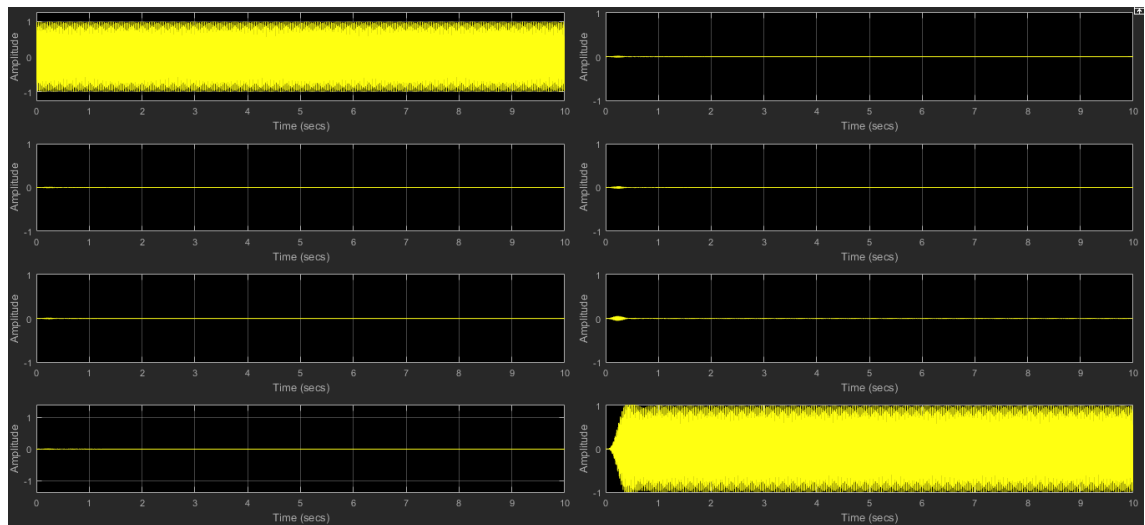


Figura: Simulación nota SI.

Conclusiones

Si bien los filtros digitales gozan de importantes ventajas, cabe destacar sus limitaciones inherentes a su naturaleza digital. Este tipo de filtros presenta fundamentalmente dos problemas, que son críticos en su diseño: su precisión y estabilidad.

El problema de precisión se debe a que los procesos aritméticos requeridos por el filtro son ejecutados con precisión finita. Las cifras suelen redondearse debido a la limitación en la capacidad de los registros.

El problema de la estabilidad aparece particularmente en los filtros digitales debido a la acción de realimentación. Además, este problema se ve acentuado por la falta de precisión.

La elección adecuada de la topología del filtro y la forma de su realización son de fundamental importancia para reducir los problemas de estabilidad y precisión mencionados.

Para reducir estos problemas de precisión, es importante utilizar herramientas como MATLAB, para evitar errores humanos en los cálculos. Trabajar con programas de este tipo nos ayuda a integrar los conocimientos adquiridos a lo largo de la materia, obteniendo diseños y simulaciones de los distintos conceptos estudiados.

El diseño del filtro con el método directo se vuelve aritméticamente complejo cuando el orden del filtro es elevado. Utilizar herramientas como MATLAB, nos permite reducir y abstraer la complejidad de estos cálculos, reduciendo la probabilidad de cometer un error humano en el diseño. Además, su uso en el diseño de filtros aumenta la exactitud del cálculo en gran manera, alcanzando niveles de precisión muy superiores a las de un humano.

Concluimos que el desarrollo de este trabajo nos permite integrar los conceptos aprendidos a lo largo de la materia con herramientas informáticas que facilitan su diseño, simulación, visualización y evaluación.

Por último, queremos destacar la dinámica grupal del trabajo, enseñándonos a trabajar en equipo de manera colaborativa y enriqueciendo nuestro perfil de egresados. Los trabajos en equipo, que incluyen problemas de laboratorio, son lo más cercano al campo laboral que nos brinda la facultad. El producto final de estos trabajos es fruto de múltiples debates, discusiones y consensos, para poder lograr los objetivos propuestos que solucionan la problemática.

Bibliografía

Apuntes de clases

Ingle, V., Proakis J.G. *"Digital Signal Processing Using Matlab"*. Brooks/Cole Thomson Learning. 2000.