FILTROS PARA RELÉS DIGITALES DE PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

Luis Corrales Barrios, José Julio Paz Alvarez

537-Cor-F

Corrales Barrios, Luis

Filtros para relés digitales de protección de sistemas eléctricos / Luis Corrales Barrios, José Julio Paz Alvarez. -- La Habana : Editorial Universitaria, 2016. -- ISBN 978-959-16-3012-4. -- 54 páginas.

1. Corrales Barrios, Luis
2. Paz Alvarez, José Julio
3. Universidad de Las Tunas
4. Electrónica

Digitalización: Universidad de Camagüey

magde@ult.edu.cu

(c) Todos los derechos reservados. Luis Corrales Barrios, José Julio Paz Alvarez, 2016, Universidad de Camagüey y Editorial Universitaria Calle 23 entre F y G, No. 564. El Vedado, Ciudad de La Habana, CP 10400, Cuba.

Universidad de Camagüey
"Ignacio Agramonte Loynaz"
Facultad de Electromecánica
Dpto. Ingeniería Eléctrica

Filtros para relés digitales de Protección de sistemas eléctricos

Autores:
Dr. Luis Corrales Barrios
Ing. José Julio Paz Alvarez

Colaboradores:
Abdulsalam Alsalaeem
Lester Osaín Varona Viamontes

Camagüey, Cuba, 2014

Contenido

1. Introducción 1
2. Filtro 1
2.1. Comparación entre los filtros digitales y los analógicos 1
2.2. Aplicaciones de los filtro digitales 2
3. Conceptos básicos 3
3.1. Función de transferencia y atenuación 3
3.2 Módulo, fase y retardo de grupo 3
3.3. Diagrama de Bode 4
3.4. Frecuencia de corte 4
3.5. Frecuencia de muestreo 4
3.6. Teoría del muestreo de Nyquist 4
3.7. Atenuación 4
3.8. Aliasing 5
3.9. Expresión general de un filtro digital 7
3.10. Parámetros de los filtros digitales 9
3.11. Relación entre las respuestas transitoria y permanente 10
3.12. Clasificación de los filtros 11
3.13. Clasificación de los Filtros digitales 11
3.14. Recursividad de su función de sistema en IIR y FIR 12
3.15. Tipo de respuesta de frecuencias 14
4. Tipos de filtros 19
4.1. Filtro Butterworth 19
4.2. Filtro Chebyshev 20
4.3. Filtro Bessel 20
4.4. Filtro Cauer 21
4.5. Filtro Wiener 21
4.6. Filtro Kalman 21
4.7. Filtro antialiasing 22
4.8. Filtro sofométrico 22
5. Características de respuesta de frecuencia de los filtros 22
5.1. Butterworth 22
5.2. Chebyshev I 22
5.3. Chebyshev II 23
5.4. Elíptico 23
5.5. Window (Kaiser) 24
5.6. Window (Hamming) 24
6. Uso del MatLab 25
6.1. Descripción del uso de MatLab para el análisis de filtros 26
6.2. Tipos de respuesta e iconos 27
6.3. Marcadores de datos 28
6.4. Máscaras de Especificaciones 28
6.5. Parámetros de análisis 28
6.6. Frecuencia de muestreo 29
6.7. Región actual Información de filtro 29
6.8. Tipos de respuesta 30
6.9. Ventana para la frecuencia de muestreo 30
6.10. Área de Diseño del Tipo de filtro 30
6.11. Tipos de respuesta de los filtros 31
6.12. Opciones por regiones 31
6.13. Opciones FIR de ventana 32
6.14. Windows y parámetros ajustables 32
6.15. Botón View 33

6.16. IIR Butterworth 33
6.17. IIR Chebyshev tipo I 33
6.18. IIR Chebyshev Tipo II 34
6.19. IIR Elliptic 35
6.20. IIR Maximally Flat 35
6.21. IIR Least Pth. 36
6.22. IIR Constrained Least Pth. 36
6.23. FIR Equiripple 37
6.24. FIR Least-Squares 37
6.25. FIR Window 38
6.26. FIR Constr. Least-Squares 38
6.27. FIR Complex Equiripple 39
6.28. FIR Maximally Flat 39
6.29. Especificaciones de frecuencia para FIR Least Pth. 40
6.30. Especificaciones de frecuencia para el diseño del filtro FIR Constrained Equiripple 40
6.31. Especificaciones de frecuencia para el diseño del filtro Generalized Equiripple FIR 41
6.32. Especificaciones de frecuencia para el filtro Constrained Band Equiripple FIR 41
6.33. Especificaciones de frecuencia para el filtro Interpolated FIR 42
6.34. Especificaciones de la región de magnitud: Lowpass 43
6.35. IIR Butterworth 43
6.36. IIR Chebyshev Type I 43
6.37. IIR Chebyshev Type II 43
6.38. IIR Elliptic 44
6.39. IIR Maximally Flat 44
6.40. FIR Equiripple 44
6.41. FIR Least-Squares 44
6.42. FIR Window 44
6.43. FIR Constr. Least-Squares 44
6.44. FIR Complex Equiripple 44
6.45. FIR Maximally Flat 45
6.46. Transformar Vista general del modo filtro 45
6.47 Transformación Filtrar general Pane 45
6.48. Importar Panel Filter 46
6.49. Frecuencia de muestreo 46
6.50. Panel de diseño de filtros 47
7. Uso del LabView para el filtrado 47
7.1. Filter.vi 47
7.2. Digital FIR FIlter.vi 49
7.3. Digital IIR FIlter.vi 49
Bibliografía 51

1. Introducción

Las computadoras se han convertido en una herramienta fundamental para los diseñadores, ya que gracias a estas se consigue cada vez más elaborar mejores y variados algoritmos para el diseño de filtros y relés.

El procesamiento digital de señales es una herramienta muy útil en casos como la estimación de parámetros y las características de sistemas y señales, eliminación o reducción de ruido e interferencias y la transformación de la respuesta espectral de señales, entre otros. Su utilidad repercute en aplicaciones como el desarrollo de relés de protección, el estudio de señales biomédicas para el diagnóstico de enfermedades, la compresión de información para la transmisión de datos y el procesamiento de audio y video y en otras esferas de la ciencia y la técnica y la vida cotidiana.

2. Filtro

Un filtro es un sistema, que dependiendo de algunos parámetros, realiza un proceso de discriminación de una señal de entrada obteniendo una señal con variaciones en su salida. Los filtros digitales tienen como entrada una señal digital y a su salida tienen otra señal digital, pudiendo haber cambiado en amplitud, frecuencia o fase dependiendo de las características del filtro. El filtrado digital es parte del procesado digital de señales. Se le da la denominación de digital, más por su funcionamiento interno, que por su dependencia del tipo de señal a filtrar, así podríamos llamar filtro digital tanto a un filtro que realiza el procesado de señales digitales como a otro que lo haga de señales analógicas.

El filtrado digital consiste en la realización interna de un procesamiento de datos de entrada. El valor de la muestra de la entrada actual y algunas muestras anteriores (que previamente habían sido almacenadas) son multiplicadas, por unos coeficientes definidos. También puede tomar valores de la salida en instantes pasados y multiplicarlos por otros coeficientes. Finalmente todos los resultados de todas estas multiplicaciones son sumados, dando una salida para el instante actual. Esto implica que internamente, tanto la salida como la entrada del filtro serán digitales, por lo que puede ser necesaria una conversión análogo - digital o digital - análoga para uso de filtros digitales con señales analógicas.

En otras palabras, un filtro digital es un algoritmo implementado en hardware y/o software que opera sobre una señal de entrada digital (discreta en tiempo y cuantificada en amplitud) y genera una señal digital de salida, con la finalidad de efectuar un proceso de filtrado. El término “filtro digital” se refiere al hardware o software específico que ejecuta el algoritmo. Los filtros digitales trabajan sobre valores numéricos asociados a muestras de esas señales analógicas previamente digitalizadas por conversores análogo - digitales (A/D) o simplemente sobre un conjunto de números almacenados en la memoria de una computadora o microprocesador.

Figura 1. Diagrama bloques simplificado de un filtro digital.

2.1. Comparación entre los filtros digitales y los analógicos

- Los filtros digitales pueden tener características que son imposibles de conseguir con el uso de filtros analógicos, como por ejemplo una respuesta de fase exactamente lineal.
- El desempeño de los filtros digitales no varía con las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.) como sí ocurre con los filtros analógicos, lo que elimina la necesidad de calibrarlos periódicamente.
- Si el filtro se implementa utilizando un procesador programable la respuesta en frecuencia de un filtro digital puede ajustarse a voluntad (filtrado adaptativo).
- Un único filtro puede procesar varias señales o canales de entrada sin necesidad de replicar el hardware.

- Las señales filtradas y sin filtrar pueden almacenarse para uso o análisis posterior.
- Los avances en las técnicas de integración VLSI hacen que sea posible fabricar filtros digitales pequeños, de bajo consumo, y de muy bajo costo.
- La precisión con que un filtro digital verifica las especificaciones de diseño está limitada solamente por la longitud de palabra (bits) utilizada para representar los coeficientes del filtro y ejecutar las operaciones aritméticas. Con los filtros analógicos es difícil lograr atenuaciones que excedan los 60 o 70 dB en la banda de rechazo (utilizando componentes convencionales).
- El desempeño de los filtros digitales es repetible de unidad a unidad.
- Los filtros digitales pueden utilizarse a muy bajas frecuencias, como las que se encuentran en aplicaciones de relés y biomédicas, donde el empleo de filtros analógicos es poco práctico por los valores muy elevados de los componentes pasivos involucrados (capacitores, inductancias). Además, los filtros digitales pueden trabajar sobre un amplio rango de frecuencias simplemente cambiando la frecuencia de muestreo.

Sin embargo, los filtros digitales también presentan una serie de desventajas respecto a los filtros analógicos:

- Limitación de frecuencia. La frecuencia de Nyquist (que fija el ancho de banda útil que el filtro puede procesar) queda definida por el proceso de conversión (tiempos de conversión del convertidores A/D y D/A), velocidad del procesador, cantidad de operaciones a ejecutar por unidad de tiempo, etc. Este último término se incrementa a medida que aumenta la exigencia de las características de respuesta del filtro (filtros muy abruptos).
- Efectos de longitud finita de palabra. En general, los coeficientes del filtro implementado serán distintos de los calculados teóricamente si la representación numérica que se utiliza para implementar el filtro no es de precisión infinita (punto flotante). No sólo influye la cuantificación de los coeficientes del filtro, sino también el redondeo de las operaciones numéricas, la cuantificación de los convertidores A/D y D/A, la transacción que ocurre al almacenar los contenidos del acumulador en la memoria, etc. Estos efectos, que se modelan como fuentes de ruido de distribución uniforme, pueden limitar seriamente el desempeño de los filtros digitales: variaciones de ganancia en la banda de paso, menor atenuación en la banda de rechazo, y hasta pueden conducir a la inestabilidad en filtros recursivos de orden elevado.
- Tiempos de diseño y desarrollo prolongados. Los tiempos de diseño y desarrollo de un filtro digital, en especial el diseño del hardware puede ser muy superior al necesario para el diseño de un filtro analógico. Sin embargo, una vez que se dispone del hardware o el software necesario, la misma plataforma puede utilizarse para muchas otras tareas de filtrado o procesamiento digital de señales con poca o ninguna modificación. Además, el desarrollo de herramientas de CAD avanzadas hacen que el diseño de filtros sea una tarea agradable y sencilla, aunque aun así, es necesaria cierta experiencia para aprovecharlas íntegramente.

2.2. Aplicaciones de los filtro digitales

Los filtros digitales tienen diversas aplicaciones las más importantes son:

a) Acondicionamiento de señal de entrada:

- Eliminación de ruido en las señales de los sensores.
- Selección de las frecuencias útiles.
- Eliminación de las frecuencias indeseables.

b) Eliminación de las frecuencias indeseables:

- Eliminación de frecuencias superiores (Aliasing).
- Fijación del ancho de banda para compresión o transmisión.

c) Acondicionamiento de señal producida:

- Eliminación de armónicos.
- Supresión de interferencias conducidas y radiadas.
- Mejora de la linealidad o el rendimiento.

3. Conceptos básicos

A continuación se analizarán conceptos que son importantes para conocer los algoritmos y funcionamiento de los filtros.

3.1. Función de transferencia y atenuación

Una función de transferencia es un modelo matemático, que relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación.

Cuando las raíces en cada uno de los modelos son igual a cero, podemos obtener sus polos. Es decir, con esto se representa la región frontera, a la que no debe llegar, ya sea la respuesta del sistema o la excitación al mismo.

Emplearemos la representación mediante las transformadas de Laplace de la entrada y la salida. Entonces, para el sistema de la figura 2 se tiene

$R(s) = H(s)\, E(s)$ (1)

Donde H(s) es la función transferencia.

E (s) es la señal de entrada o excitación en Transformada de Laplace.

R (s) es la señal de salida en Transformada de Laplace.

$$A(s) = \frac{1}{\mathbf{H(s)}} \qquad (2)$$

Esta es una terminología heredada de la teoría de redes de transmisión y que ha resultado conveniente para el análisis de filtros pasivos, ya que el módulo en general resulta mayor que 1. Su unidad de medición es el decibel (dB). El empleo de la función de transferencia permite unificar la teoría de los filtros con el resto de la teoría de los sistemas lineales.

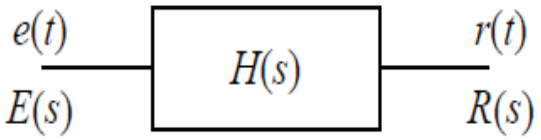


Figura 2. Un sistema lineal representable por medio de la función de Transferencia que relaciona las transformadas de Laplace de la excitación y la respuesta.

3.2 Módulo, fase y retardo de grupo

Es interesante el comportamiento en s = jω, ya que corresponde a la respuesta en frecuencia. Entonces, podemos escribir:

$$H(jw) = R(w) + j\, I(w) = |H(jw)|\, e^{-j\varphi(j\omega)} \qquad (3)$$

Dónde:

$$|H(jw)| = \sqrt{R^2(w) + I^2(w)} \qquad (4)$$

$$\varphi(j\omega) = tg^{-1}\frac{I(w)}{R(w)}\sqrt{R^2(w) + I^2(w)} \qquad (5)$$

Las funciones de transferencia sintetizables con una cantidad finita de componentes de circuito son siempre racionales. En particular esto implica que R(w) e I(w) son racionales. En cambio, el módulo y la fase no lo son, lo cual dificulta su manejo analítico. |H(jw)| puede convertirse en racional elevándola al cuadrado:

$$|H(jw)|^2 = R^2(w) + I^2(w) \qquad (6)$$

Así mismo, derivando φ (jw) con respecto a w, se tiene:

$$\frac{d\varphi(j\omega)}{d\omega} = \frac{R(w)I'(w) + R'(w)I(w)}{R^2(w) + I^2(w)} \qquad (7)$$

que es también, una función racional.

Se define el retardo de grupo τ(w) como:

$$\tau(w) = -\frac{d\varphi(j\omega)}{d\omega} \qquad (8)$$

El signo y el nombre provienen de la interpretación siguiente:

Si φ (0) =0,entonces:

$$\varphi(jw_0) = -\int_0^{w_0} \tau(w)\, dw \qquad (9)$$

Pero un desfasaje φ (jw_0) representa un retardo temporal:

$$T(w_0) = -\frac{\varphi(jw_0)}{w_0} \qquad (10)$$

$$T(w_0) = -\frac{1}{w_0}\int_0^{w_0} \tau(w)\, dw \qquad (11)$$

De manera que el retardo que experimenta una onda sinusoidal de frecuencia w_o, es el promedio de $\tau(w)$ entre 0 y w_o. En el caso particular en que $\tau(w)$ es constante, representa el retardo que experimentan todas las frecuencias.

3.3. Diagrama de Bode

El diagrama de Bode es la representación gráfica de H(S) = H(jω) y se divide en dos: diagrama de módulo y diagrama de fase.

3.4. Frecuencia de corte

Es la frecuencia, bien por arriba o bien por debajo de la cual el nivel de salida de un filtro, se reduce por un factor de $\sqrt{2}/2$ al valor de - 3 dB = 70,71% respecto al nivel de referencia de 0 dB = 100%.

3.5. Frecuencia de muestreo

La tasa o frecuencia de muestreo es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta, durante el proceso necesario para convertirla de analógica en digital. Como todas las frecuencias, generalmente se expresa en Hertz (Hz o ciclos por segundo) o múltiplos suyos, como el kilo Hertz (kHz), aunque pueden utilizarse otras magnitudes.

3.6. Teoría del muestreo de Nyquist

El teorema de muestreo fue desarrollado en 1928 por Nyquist y probado matemáticamente por Claude Shannon en 1949. La teoría del muestreo define que para una señal de ancho de banda limitado, la frecuencia de muestreo, f_m, debe ser mayor que dos veces su ancho de banda [B] medida en Hertz [Hz]. $f_m > 2 \cdot B$.

3.7. Atenuación

Se denomina atenuación de una señal, sea esta acústica, eléctrica u óptica, a la pérdida de potencia de la misma al transitar por cualquier medio de transmisión.

Así, si introducimos una señal eléctrica con una potencia P_2 en un circuito pasivo, como puede ser un conductor, esta tendrá una atenuación, y al final de dicho circuito obtendremos una potencia P_1. La atenuación (α) será igual a la diferencia entre ambas potencias.

La atenuación no suele expresarse como diferencia de potencias sino en unidades logarítmicas como el decibel, de manejo más cómodo a la hora de efectuar cálculos.

En términos de potencia: $$\frac{\alpha = 10 * \log P_1}{P_2} \qquad (12)$$

En términos de tensión: $$\frac{\alpha = 10 * \log V_1}{V_2} \qquad (13)$$

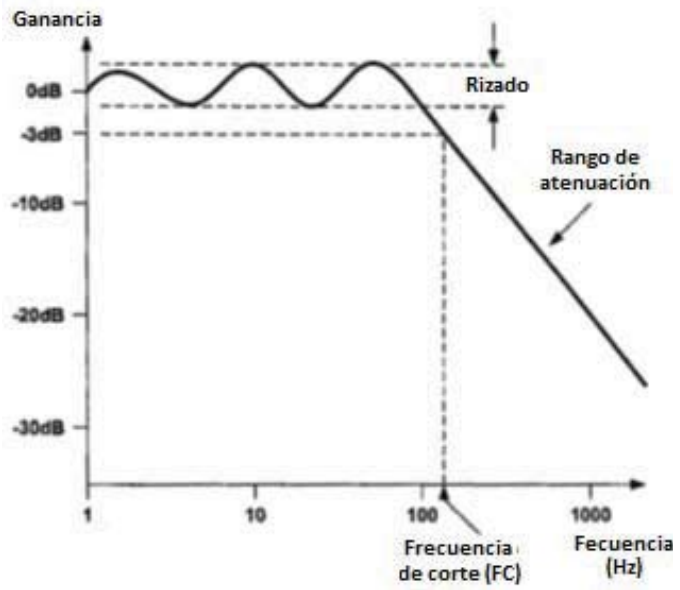


Figura 3. Diagrama de Bode

3.8. Aliasing

El aliasing es la aparición de una onda de frecuencia diferente a la onda de la frecuencia medida, en la conversión análoga - digital de señales, se manifiesta debido a el muestreo incorrecto de señales analógicas, lo que puede provocar que señales de alta frecuencia se presenten como señales de baja frecuencia.

El efecto aliasing consiste en que se el filtro mide una señal con otra frecuencia diferente a la original, tal como se muestra en la figura 4.

Los filtros antialiasing son filtros pasa bajo con frecuencia de corte igual a la mitad del rango de muestreo del conversor análogo – digital (ADC).

Un filtro antialiasing ideal tiene una frecuencia de corte fc, con una ganancia menor que la del filtro para otras frecuencias, tal como se muestra en la figura4.

En la figura 4a, se observa en la parte (a), a la izquierda la señal y a la derecha el muestreo. En las parte (b), (c) y (d) muestreos adecuados y en la parte (e) un número de muestras muy bajo, que da como resultado que se mida una señal de baja frecuencia que no existe (aliasing). En la figura 4b, se observa el mismo fenómeno en la parte superior y en la inferior se nota que no parece el aliasing cuando se utiliza frecuencia de muestreo alta.

El filtro antialiasing está compuesto por elementos pasivos (R y C), o por activos (amplificadores operacionales con estos elementos). Entre el conversor análogo – digital y el filtro antialiasing, se ponen otros elementos. En general hay que buscar un compromiso entre el tiempo de retardo del filtro antialiasing y la frecuencia de corte del mismo. Filtros de dos etapas RC son adecuados.

Filtros Butterworth, Chebyshev o Bessel se utilizan en la protección por computadora. Se ha demostrado que filtros de 720 Hz, o sea, 12 muestras por ciclo (si la señal fundamental es de 60 Hz) son adecuados cumpliendo el compromiso anterior. El filtro debe de tener una frecuencia de corte de 360 Hz.

El aliasing es también una preocupación en el área de la computación gráfica e infografía, donde puede dar origen a patrones de Moiré (en las imágenes con muchos detalles finos) y también a bordes dentados. El aliasing nos puede traer problemas sobre todo en el campo de visión por computadoras, ya que al procesar imágenes, si no es correcta la imagen obtenida con la realidad, podemos tener problemas con el hardware.

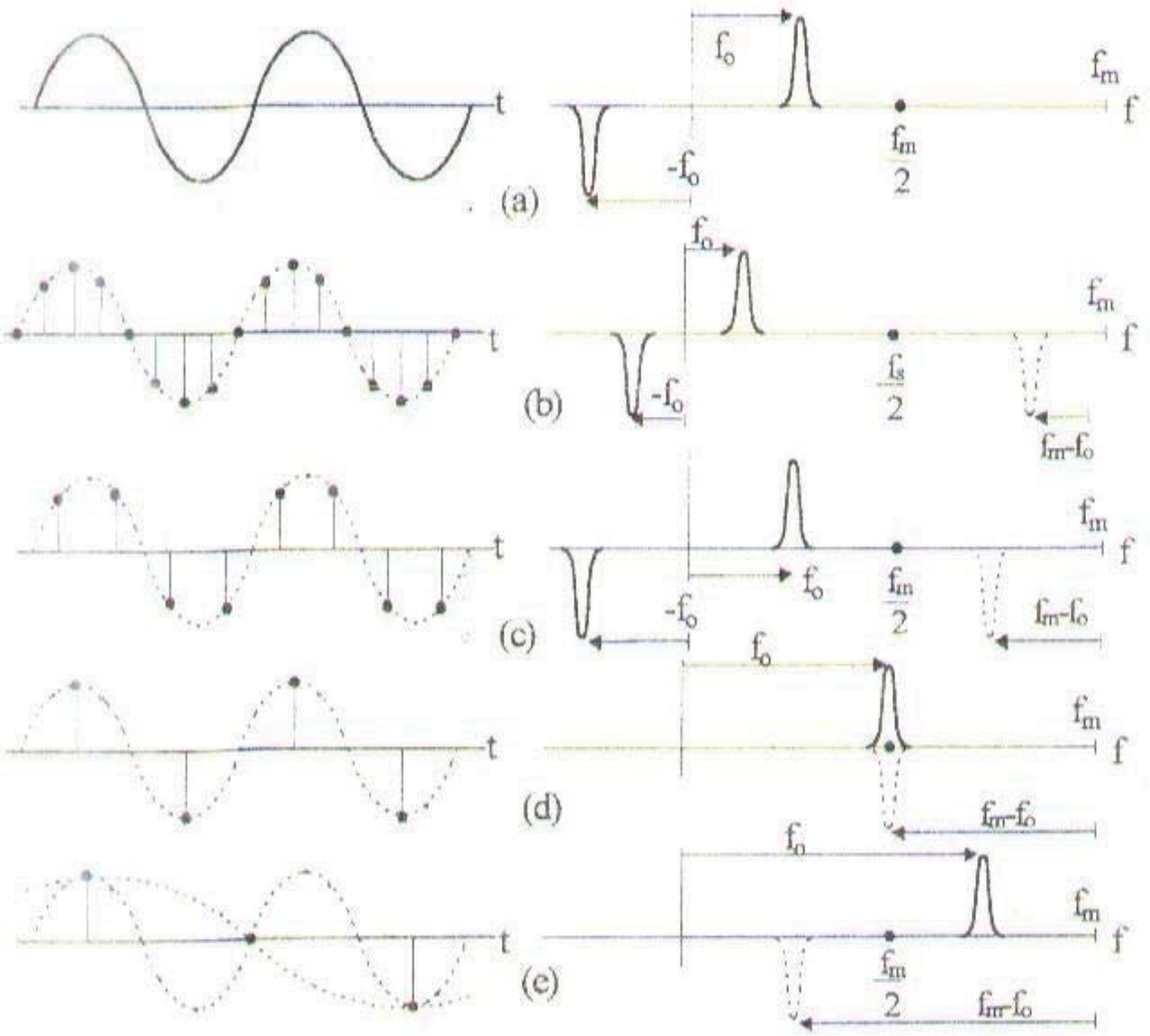


Figura 4a. Aparición del aliasing por efecto del muestreo

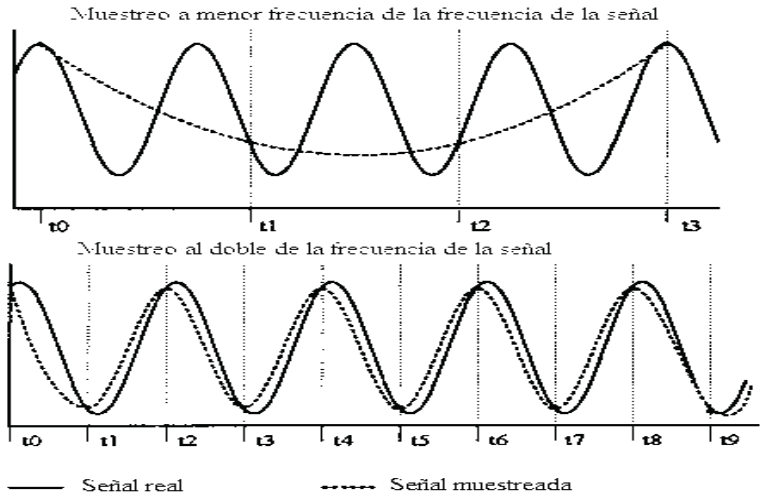


Figura 4b. Comparación de señales con aliasing y sin aliasing

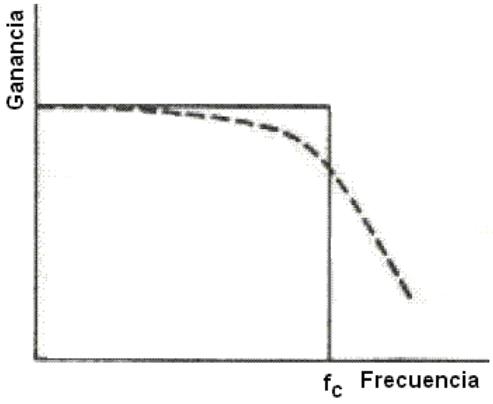


Figura 5. Relación ganancia frecuencia del filtro antialiasing.

3.9. Expresión general de un filtro digital

En muchas aplicaciones del procesado de señales es necesario diseñar dispositivos o algoritmos que realicen operaciones sobre las señales y que los englobaremos bajo la denominación genérica de sistemas.

Un sistema opera sobre una señal de entrada o excitación según una regla preestablecida, para generar otra señal llamada salida o respuesta del sistema a la excitación propuesta y que puede simbolizarse:

$$y[n] = T(x[n]) \qquad (14)$$

Donde T simboliza la transformación, operador o procesado realizado por el sistema sobre la señal " x " para producir la señal " y ", (Figura 6). Una de las motivaciones más fuertes para el desarrollo de herramientas generales para el análisis y diseño de sistemas es que proviniendo a menudo de aplicaciones muy diferentes tienen descripciones matemáticas similares. Existen varias maneras de representar un sistema, ya que muchos sistemas reales están construidos como interconexiones de varios subsistemas, tal como se grafica en la Figura 7.

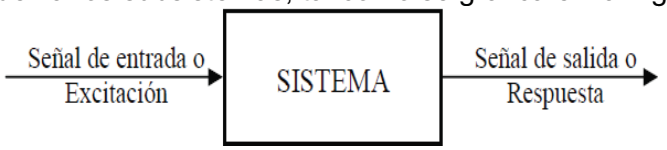


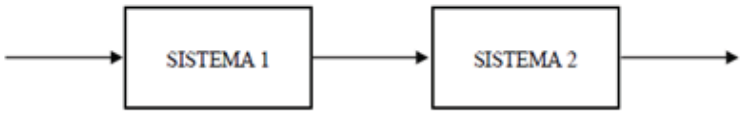
Figura 6. Esquema de sistema, señal de entrada y respuesta o salida del sistema.

Existen dos métodos básicos para el análisis del comportamiento o respuesta de un sistema lineal a una determinada entrada.

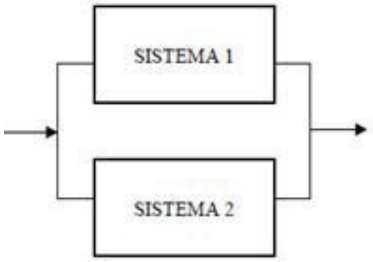
a) Un primer camino se basa en obtener la solución de la ecuación entrada-salida del sistema que en general tiene la forma de las ecuaciones en diferencias lineales a coeficientes constantes a_m; b_k:

$$\sum_{m=0}^{N_a-1} a_m\, y[n-m] = \sum_{k=0}^{N_b-1} b_k\, x[n-k] \qquad (15)$$

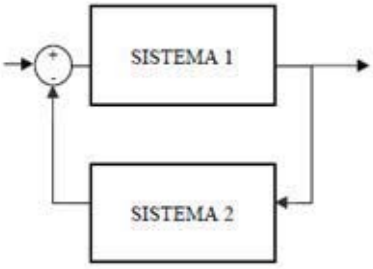
Donde N_a y N_b los órdenes máximos de las diferencias en la ecuación correspondientes a la salida y entrada del sistema.



a) Serie o cascada



b) Paralelo



c) Con realimentación

Figura 7. Interconexión de Sistemas

b) El segundo método para el análisis del comportamiento del sistema reside en la aplicación del principio de superposición y consiste en descomponer la señal de entrada en una suma pesada de señales elementales las cuales se escogen de manera que sea conocida la respuesta del sistema a las mismas. Siguiendo esta línea, una señal a tiempo discreto puede visualizarse como una secuencia pesada de impulsos unitarios:

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot \delta[n-k] \qquad (16)$$

Aplicando la propiedad de superposición de los sistemas lineales e invariantes en el tiempo, se puede determinar la salida del sistema ante una cierta entrada de la siguiente manera:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot \boldsymbol{h}[n-k] \qquad (17)$$

Siendo h[n] la respuesta o salida del sistema ante una entrada equivalente a un impulso unitario.

δ [n] se denomina a la respuesta al impulso del sistema. El segundo miembro de la expresión representa el producto de convolución de la señal de entrada x[n] y la respuesta al impulso del sistema h[n], esto es:

$$y[n] = x[n] \cdot \boldsymbol{h}[n] = \boldsymbol{h}[n] \cdot x[n] \qquad (18)$$

Tanto en el caso continuo como en el caso discreto, la respuesta al impulso del sistema lineal e invariante en el tiempo, presenta las siguientes propiedades:

a) sin memoria: h[n] = 0 para n ≠ 0

b) causal: h[n] = 0 para n < 0

c) invertible: dado h[n] existe h'[n] tal que h[n] · h'[n] = δ[n]

d) estable: $\sum_{k=-\infty}^{\infty} |\boldsymbol{h}[n]| < \infty$

Existen otras formas de representar un filtro, todas estas equivalentes a la respuesta al impulso unitario de sistemas lineales e invariantes en el tiempo, sin embargo, muchas veces conviene más una u otra representación. En el caso aplicar la transformada Z, a la ecuación en diferencias de (15) se obtiene la función de transferencia del sistema:

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^{N_b-1} b_k Z^{-k}}{\sum_{m=0}^{N_a-1} a_m Z^{-m}} \qquad (19)$$

En donde $z = A\ e^{j\Omega}$ es la variable compleja en forma polar. Particularmente, si el modulo A =1, la expresión (19) se reduce a la respuesta en frecuencia del sistema a través de la transformada de Fourier a tiempo discreto:

$$H(\Omega) = \frac{\sum_{k=0}^{N_b-1} b_k e^{-j\Omega k}}{\sum_{m=0}^{N_a-1} a_m e^{-j\Omega k}} \qquad (20)$$

Donde Ω es la frecuencia angular relacionada a dicha transformada. Por otro lado, para el caso de realizar la representación en el domino temporal discreto o de la variable n, se obtiene la salida del sistema:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N_b-1} b_k x[n-k] - \sum_{m=1}^{N_a-1} a_m y[n-m] \qquad (21)$$

Donde los coeficientes a_m y b_k son los coeficientes que definen el filtro, por lo tanto, el diseño consiste en calcularlos. Como regla general se suele dejar el término a_0 =1.

3.10. Parámetros de los filtros digitales

1. En el dominio de la frecuencia:

La descripción de las características de eventos de naturaleza oscilatoria está representada en el dominio de la frecuencia. La información en este caso, no está contenida en las muestras individuales, está contenida en la relación entre muestras.

Las modificaciones en la información en el dominio de la frecuencia están mejor especificadas en la respuesta en frecuencia del filtro, y tiene los siguientes parámetros:

- Frecuencia de corte (fc ó fo): 3 dB por debajo de la ganancia máxima. Se corresponde con un punto singular (polo o cero) donde se cortan las asíntotas.
- Banda de paso (fp)
- Banda atenuada (fa)
- Zona de transición (fa-fp)
- Ganancia en ambas bandas (A_{min}, A_{max})
- Nivel de rizado
- Desfasaje en frecuencia
- Factor de calidad: este factor sólo tiene sentido en los filtros pasa - banda y rechazo banda resonantes. Se llama Q y se define como: Q = fc/BW.

Para el diseño, se suele normalizar a A_{max} = 1 y fp=1.

2. En el dominio del tiempo:

La descripción del momento de ocurrencia de eventos y la magnitud del evento está codificada en el dominio del tiempo, es decir, en la forma de onda.

Las modificaciones en la información en el dominio del tiempo están mejor especificadas en la respuesta al escalón del filtro. Los parámetros en este caso son:

- Tiempo de subida: Es la cantidad de muestras en pasar del 10 % al 90% de amplitud de la respuesta al escalón. El tiempo de subida debe ser rápido para identificar eventos cercanos en el tiempo.

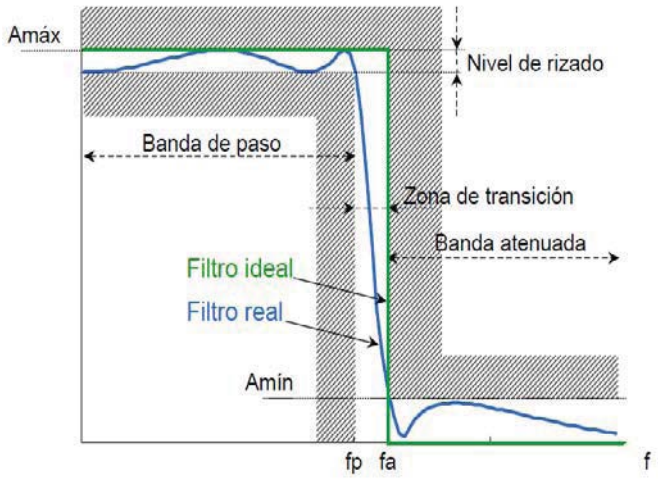


Figura 8. Los parámetros de un filtro digital en el dominio de la frecuencia.

• Sobreoscilación: amplitud del pico que sobrepasa la amplitud del escalón. Sobreoscilaciones grandes producen distorsión en la forma de onda.

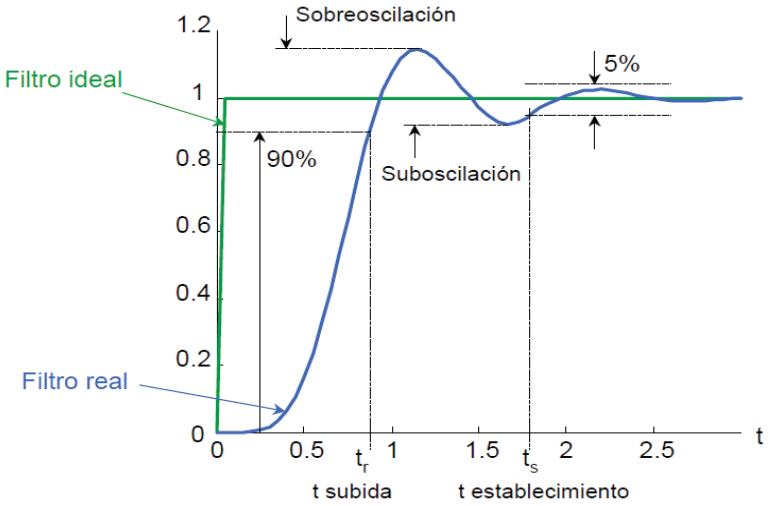


Figura 9. Los parámetros de un filtro digital en el dominio del tiempo.

3.11. Relación entre las respuestas transitoria y permanente

El comportamiento temporal de un filtro está fuertemente condicionado por su respuesta transitoria. Conceptualmente, el régimen transitorio es el recurso que tiene un sistema para llegar al régimen permanente (o definitivo) a partir de condiciones iníciales que no coinciden con las correspondientes a dicho régimen permanente.

Relación entre el régimen transitorio y la respuesta en frecuencia H(jω):

Una de las excitaciones más utilizadas para el estudio del comportamiento transitorio es el escalón. Se puede lograr la asimilación mencionada reemplazando el escalón por un "escalón repetitivo", es decir, una onda cuadrada de muy baja frecuencia. Al estar las conmutaciones muy separadas en el tiempo, cada nueva conmutación encuentra el filtro con el transitorio anterior virtualmente extinguido y entonces la respuesta es enteramente comparable al transitorio producido por un escalón. Si la onda cuadrada se representa como una serie de Fourier:

$$v_1(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{2k-1}\,\mathrm{sen}(2k-1)w_1 t \qquad (22)$$

Entonces la respuesta es:

$$v_2(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{|H(j(2k-1)w_1)|}{2k-1}\text{sen}\left((2k-1)w_1 t + \varphi(j(2k-1)w_1)\right) \quad (23)$$

El transitorio correspondiente a un escalón unitario corresponde al límite cuando $\omega_1 \to 0$.
Llamando $\omega_k = (2k-1)\,\omega_1$ y $\Delta\omega = 2\omega_1$, la sumatoria queda planteada en una forma, cuyo límite es la siguiente integral:

$$\lim_{w_1 \to 0}(v_2 t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\sum_{0}^{\infty}|H(jw)|\frac{\text{sen}(wt + \varphi(jw))}{w}\,dw \qquad (24)$$

Entonces, que una vez especificada una respuesta en frecuencia en amplitud y fase, la respuesta transitoria (ante un escalón) queda determinada unívocamente.

3.12. Clasificación de los filtros

Hay diversas clasificaciones de los filtros desde el punto de vista general. Cuando la señal es una magnitud eléctrica (corriente o tensión), es un filtro eléctrico. Existen también filtros mecánicos, filtros acústicos, filtros ópticos, etc.
Otra clasificación es en filtros lineales y filtros no lineales, según que su comportamiento pueda o no modelarse matemáticamente con ecuaciones lineales. Un ejemplo de filtro no lineal es un comparador de tensión.
Otra clasificación es en filtros analógicos y filtros digitales. Los filtros analógicos son aquellos en los cuales la señal puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo, y los digitales corresponden al caso en que la señal toma sólo valores discretos.
También pueden clasificarse en filtros continuos y filtros discretos o muestreados, según que la señal se considere en todo instante o en instantes discretos. Dado que los filtros digitales en la práctica son siempre muestreados, el nombre "filtro digital" se refiere habitualmente a filtros discretos digitales. Sin embargo, existen filtros discretos no digitales, como los filtros de capacidades conmutadas.
Finalmente, los filtros también pueden clasificarse en filtros activos o filtros pasivos según empleen o no fuentes controladas (elementos activos, tales como amplificadores y sus derivados). Los filtros eléctricos pasivos se implementan en general con inductores y capacitores. Dado que los inductores son elementos, voluminosos, pesados y costosos, el empleo de filtros pasivos es poco conveniente excepto en frecuencias bastante altas. Los inductores pueden eliminarse mediante el uso de amplificadores y técnicas de realimentación.

3.13. Clasificación de los Filtros digitales

Los filtros digitales se clasifican atendiendo a:
De acuerdo a la señal que procesan:
a) Analógicos: son un tipo de filtro electrónico que discriminan las señales o componentes de una señal analógica que pasan a su vez, atendiendo a algunas de sus características, habitualmente su frecuencia.
Atendiendo a la ganancia se divide en:

- Filtros pasivos: los que atenuarán la señal en mayor o menor grado. Se implementan con componentes pasivos como condensadores, bobinas y resistencias.
- Filtros activos: son los que pueden presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la de entrada. En su implementación suelen aparecer amplificadores operacionales. No suelen contener bobinas, salvo en el caso de frecuencias muy altas.

b) **Digitales:** Un filtro digital es un sistema que, dependiendo de las variaciones de las señales de entrada en el tiempo y amplitud, se realiza un procesamiento matemático sobre dicha señal; generalmente mediante el uso de la Transformada rápida de Fourier; obteniéndose en la salida el resultado del procesamiento matemático o la señal de salida.
Los filtros digitales tienen como entrada una señal analógica o digital y en su salida tienen otra señal analógica o digital, pudiendo haber cambiado en amplitud, frecuencia o fase dependiendo de las características del filtro digital.
El filtrado digital es parte del procesado de señal digital. Se le da la denominación de digital más por su funcionamiento interno que por su dependencia del tipo de señal a filtrar, así podríamos

llamar filtro digital tanto a un filtro que realiza el procesado de señales digitales como a otro que lo haga de señales analógicas.
Comúnmente se usa para atenuar o amplificar algunas frecuencias, por ejemplo se puede implementar un sistema para controlar los tonos graves y agudos del audio del estéreo del auto. El procesamiento interno y la entrada del filtro serán digitales, por lo que puede ser necesario una conversión analógica-digital o digital-analógica para uso de filtros digitales con señales analógicas.

3.14. Recursividad de su función de sistema en IIR y FIR

Un filtro recursivo puede aproximar una respuesta impulsiva deseada con error arbitrariamente pequeño. En teoría, la respuesta impulsiva de un filtro recursivo es infinitamente larga (de ahí el nombre IIR), pero en la práctica la respuesta decae exponencialmente rápido a cero y se la puede truncar después de algunos cientos de muestras cuando ha decaído a valores insignificantes, manteniendo la cota de error. El comportamiento es equivalente a filtrar la señal con un filtro FIR de orden elevado, pero con muchas menos operaciones por muestra que las que serían necesarias para un filtro IIR de la misma longitud.

1. Recursivos (Filtros IIR)

IIR es una sigla en inglés para Infinite Impulse Response o Respuesta infinita al impulso. Se trata de un tipo de filtros digitales en el que, como su nombre indica, si la entrada es una señal impulso, la salida tendrá un número infinito de términos no nulos, es decir, nunca vuelve al reposo.

Expresión matemática

La salida de los filtros IIR depende de las entradas actuales y pasadas, y además de las salidas en instantes anteriores. Esto se consigue mediante el uso de realimentación de la salida.

$$y_n = b_0\, x_n + b_1\, x_{n-1} + \cdots + b_N\, x_{n-N} - a_1\, y_{n-1} - a_2\, y_{n-2} - \cdots - a_M\, y_{n-M} \quad (25)$$

Donde los coeficientes **a** y **b** son los coeficientes del filtro. El orden es el máximo entre los valores de M y N. donde M y N son los términos que determinan la cantidad de polos y ceros en la función de transferencia.

Aplicando la transformada Z a la expresión anterior se obtiene lo siguiente:

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^{N} b_k Z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^{N} a_k Z^{-k}} \quad (26)$$

Estructura

Hay numerosas formas de implementar los filtros IIR. La estructura afecta a las características finales que presentará el filtro como la estabilidad. Otros parámetros a tener en cuenta a la hora de elegir una estructura es el gasto computacional que presenta.

Diseño

Las formas habituales de diseñar este tipo de filtros son:

- Indirecta (a partir de prototipos analógicos)
  - Impulso invariante
  - Aproximación de derivadas
  - Transformación bilineal
- Directa
  - Aproximación de Padé
  - Aproximación de mínimos cuadrados

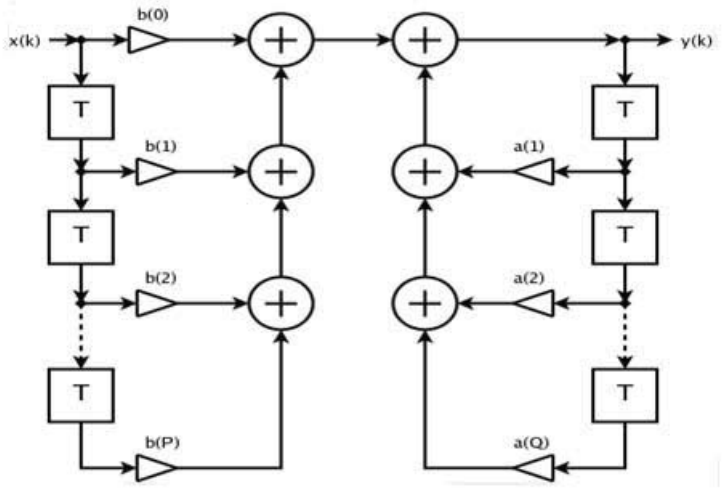


Figura 10. Diagrama de bloques de la estructura básica del filtro IIR

Características

Este tipo de filtros presenta polos y ceros que determinan la estabilidad y la causalidad del sistema. Cuando todos los ceros y polos están en el interior de la circunferencia unidad se dice que es fase mínima y el sistema es estable y causal. Si todos los ceros están en el exterior es fase máxima, y si algún polo está fuera de la circunferencia unidad el sistema es inestable.

Las principales diferencias respecto a los filtros FIR es que los IIR pueden cumplir las mismas exigencias que los anteriores pero con menos orden de filtro. Esto es importante a la hora de implementar el filtro, pues presenta una menor carga computacional. Este tipo de filtros puede ser inestable, aun cuando se diseñen para ser estables. En principio no pueden diseñarse para tener fase lineal pero se pueden aplicar algunas técnicas como el filtrado bidireccional para lograrlo.

2. No recursivos (Filtros FIR):

Los filtros digitales de Respuesta Finita Impulsiva o filtros FIR por sus siglas en ingles Finite Impulse Response, se trata de un tipo de filtros digitales en el que, como su nombre indica, si la entrada es una señal impulso la salida tendrá un número finito de términos no nulos.

Expresión matemática:

La estructura de señal a la salida del filtro se basa solamente en la combinación lineal de las entradas actuales y anteriores, esto es:

$$y[n]=\sum_{k=0}^{N-1} b_k x[n-k]=\sum_{k=0}^{N-1} h[k]x[n-k] \;\; con \;\; h[k]=\{h_0\, h_1 \ldots h_{N-1}\} \qquad (27)$$

En donde N es el orden del filtro, que también coincide con el número de términos no nulos y con el número de coeficientes b_k del filtro. Observe que la expresión de la ecuación (9) corresponde a la convolución de la señal de entrada x[n] con la respuesta al impulso del filtro FIR h[n].

Aplicando la transformada Z a la respuesta impulso del filtro FIR h[n], se tiene:

$$H(z)=\sum_{k=0}^{N-1} h_k\, z^{-k} = h_0 + h_1\, z^{-1} + \cdots + h_{N-1}\, z^{-k-(N-1)} \qquad (28)$$

Estructura

El diagrama en bloques de la estructura básica del filtro FIR, para una cantidad de 12 coeficientes se representa en la figura 11.

Diseño

Para diseñar un filtro FIR es necesario tener en cuenta que la cantidad de coeficientes o duración de la respuesta al impulso del filtro es siempre finita, a diferencia de la repuesta al impulso de su respectivo filtro ideal. Por lo que la respuesta al impulso del filtro FIR exhibirá cierto truncamiento implícito en comparación con la respuesta al impulso del filtro ideal.

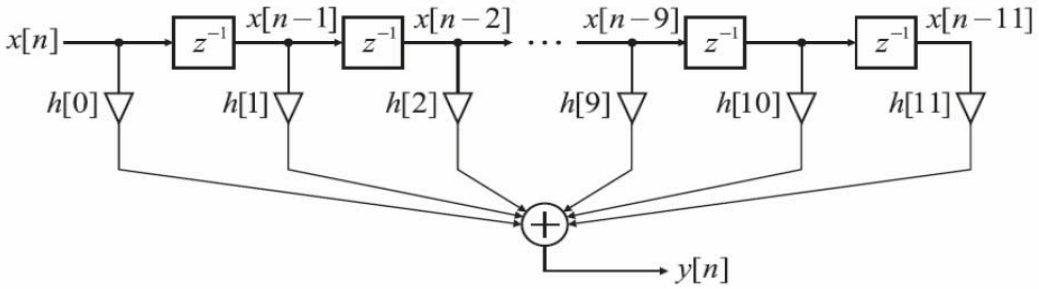


Figura 11. Diagrama en bloques de la estructura básica del filtro FIR, para un total de 12 coeficientes.

Hay tres métodos básicos para diseñar los filtros FIR:

- Método de las ventanas. Las más habituales son:
  - Ventana rectangular
  - Ventana de Barlett
  - Ventana de Hann
  - Ventana de Hamming
  - Ventana de Blackman
  - Ventana de Kaiser
- Muestreo en frecuencia.
- Rizado constante (Aproximación de Chebyshev y algoritmo de intercambio de Remez).

Características

Las características principales de los filtros FIR es que no cuentan con retroalimentación, por lo cual cuenta con mayores localidades de memoria. Por otro lado, estos filtros son siempre estables, por lo general son de fase lineal y son más fácil de implementar que in filtro IIR. Este tipo de filtros tiene especial interés en aplicaciones de audio.

❖ La elección entre una implementación FIR e IIR depende de las ventajas relativas de cada uno de estos dos tipos de filtros.

❖ Los filtros FIR se pueden diseñar para tener una respuesta de fase estrictamente lineal (distorsión de fase nula), lo que es importante en muchas aplicaciones, como transmisión de datos, audio digital y procesamiento de imágenes. La respuesta de fase de filtros IIR no es lineal, en especial en cercanías de la zona de transición.

❖ Los filtros FIR implementados de forma no recursiva, son inherentemente estables. En cambio, la estabilidad de los filtros IIR siempre debe comprobarse, ya que son sistemas realimentados.

❖ Los efectos causados por la implementación con aritmética de punto fijo, tales como los errores de cuantificación de los coeficientes y los errores por redondeo en las operaciones aritméticas, son mucho más severos en los filtros IIR que en los FIR.

❖ Para satisfacer unas especificaciones dadas los filtros FIR necesitan un mayor número de coeficientes que los filtros IIR, sobre todo si las bandas de transición son estrechas. En consecuencia, los requerimientos de memoria, el número de operaciones y los tiempos de procesamiento son mayores para los FIR que para los IIR. Sin embargo, la posibilidad de implementar los FIR mediante la técnica de convolución rápida usando FFT y también el empleo de técnicas multirate permite aumentar significativamente la eficiencia de las implementaciones.

❖ Un filtro analógico convencional puede convertirse en un filtro digital IIR equivalente que satisfaga las especificaciones de diseño de manera sencilla. Esto no es posible con filtros FIR pues no tienen una contraparte analógica. Sin embargo es más sencillo sintetizar filtros con respuestas en frecuencia arbitrarias utilizando filtros FIR.

3.15. Tipo de respuesta de frecuencias

a) Convencionales

1. Pasa bajo: Un filtro pasa bajo corresponde a un filtro caracterizado por permitir el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias más altas. El filtro requiere de dos terminales de entrada y dos de salida, de una caja negra, también denominada cuadripolo, así

todas las frecuencias se pueden presentar a la entrada, pero a la salida solo estarán presentes las que permita pasar el filtro. De la teoría se obtiene que los filtros están caracterizados por sus funciones de transferencia, así cualquier configuración de elementos activos o pasivos que consigan cierta función de transferencia serán considerados un filtro de cierto tipo. Puede ser analógico o digital.
En particular la función de transferencia de un filtro pasa bajo de primer orden corresponde a:

$$\mathbf{H(S) = k\ \frac{1}{1+\frac{s}{w_c}}} \qquad (29)$$

Donde la constante k es sólo una ponderación correspondiente a la ganancia del filtro, y la real importancia reside en la forma de la función de transferencia 1 + s / w_c, la cual determina el comportamiento del filtro.
w_o: corresponde a la frecuencia de corte propia del filtro, aquel valor de frecuencia para el cual la amplitud de la señal de entrada se atenúa 3 dB.
De forma análoga al caso de primer orden, los filtros de pasa bajo de mayor orden también se caracterizan por su función de transferencia, por ejemplo la de un filtro pasa bajo de segundo orden corresponde a:

$$\mathbf{H(s) = k\ \frac{w_0^2}{s^2 + 2\xi w_0 + w_0^2}} \qquad (30)$$

Donde w_o es la frecuencia natural del filtro y ξ es el factor de amortiguamiento de este.

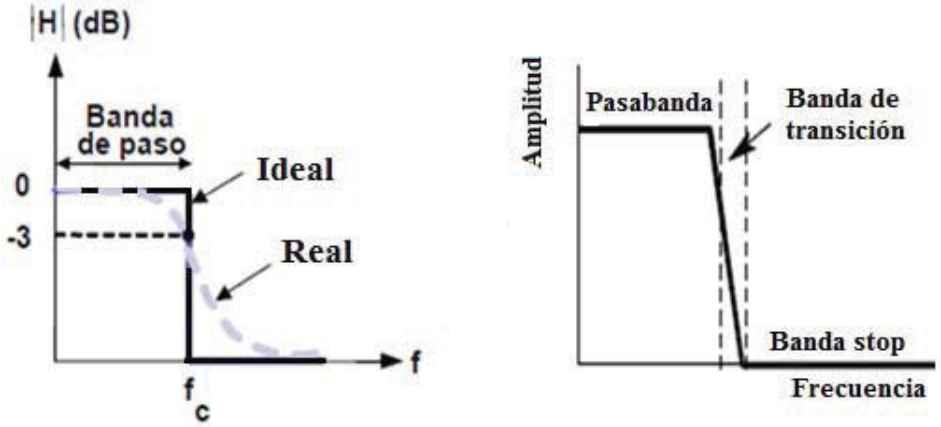


Figura 12. Filtro pasa bajo

2. Pasa alto: Un filtro pasa alto (HPF) es un tipo de filtro electrónico en cuya respuesta en frecuencia se atenúan las componentes de baja frecuencia pero no las de alta frecuencia, éstas incluso pueden amplificarse en los filtros activos. La alta o baja frecuencia es un término relativo que dependerá del diseño y de la aplicación. El filtro pasa alto más simple es un circuito RC en serie en el cual la salida es la caída de tensión en la resistencia. Si se estudia este circuito (con componentes ideales) para frecuencias muy bajas, en continua por ejemplo, se tiene que el condensador se comporta como un circuito abierto, por lo que no dejará pasar la corriente a la resistencia, y su diferencia de tensión será cero. Para una frecuencia muy alta, idealmente infinita, el condensador se comportará como un cortocircuito, es decir, como si no estuviera, por lo que la caída de tensión de la resistencia será la misma tensión de entrada, lo que significa que dejaría pasar toda la señal. Por otra parte, el desfase entre la señal de entrada y la de salida sí que varía.

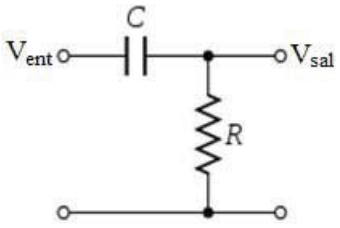


Figura 13. Filtro pasivo analógico de primer orden con circuito RC

El producto de resistencia por condensador (R×C) es la constante de tiempo, cuyo recíproco es la frecuencia de corte, es decir, donde el módulo de la respuesta en frecuencia baja 3dB.

$$Fc = \frac{1}{2\pi RC}$$

Dónde fc es la frecuencia de corte en Hertz, R es la resistencia de la aplicación en Ω y C es la capacidad en Farad.

Una posible aplicación de este tipo de filtro sería la de hacer que las altas frecuencias de una señal de audio fuesen a un altavoz para sonidos agudos mientras que un filtro pasa bajo haría lo propio con los graves.

Otra aplicación sería la de eliminar los ruidos que provienen de la red eléctrica (50 o 60 Hz) en un circuito cuyas señales fueran más altas.

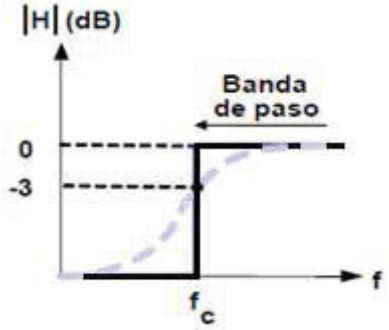


Figura 14. Filtro pasa alto.

3. Pasa banda: Un filtro pasa banda es un tipo de filtro electrónico que permite el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.

Un circuito simple de este tipo de filtros es un circuito RLC (resistor, bobina y condensador) en el que se deja pasar la frecuencia de resonancia, que sería la frecuencia central (fc) y las componentes frecuenciales próximas a ésta, en el diagrama hasta f1 y f2. No obstante, bastaría con una simple red resonante LC.

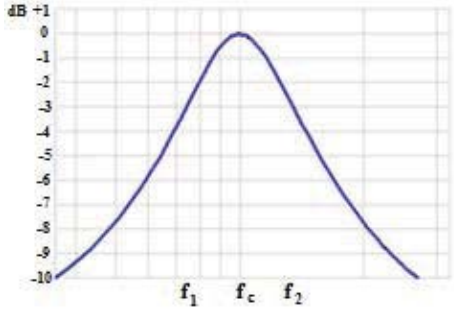


Figura 15. Respuesta frecuencial de un filtro pasa banda

Estos filtros tienen aplicación en ecualizadores de audio, haciendo que unas frecuencias se amplifiquen más que otras.

Otra aplicación es la de eliminar ruidos que aparecen junto a una señal, siempre que la frecuencia de ésta sea fija o conocida.

Fuera de la electrónica y del procesado de señal, un ejemplo puede ser dentro del campo de las ciencias atmosféricas, donde son usados para manejar los datos dentro de un rango de 3 a 10 días.

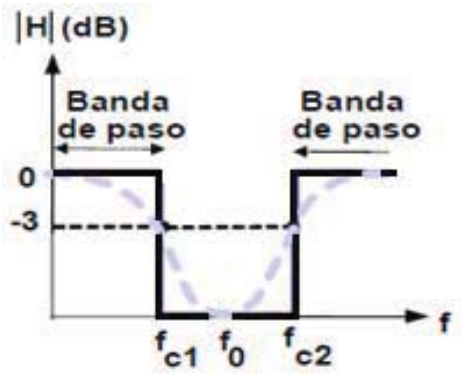


Figura 16. Filtro pasa banda

4. Rechaza banda: El filtro suprime banda, filtro rechaza banda, filtro notch o filtro trampa, es un filtro electrónico que no permite el paso de señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre las frecuencias de corte superior e inferior.

Pueden implementarse de diversas formas. Una de ellas consistirá en dos filtros, uno pasa bajo cuya frecuencia de corte sea la inferior del filtro rechaza banda y otro pasa alto cuya frecuencia de corte sea la superior del filtro rechazo banda. Como ambos son sistemas lineales e invariantes, la respuesta en frecuencia de un filtro banda eliminada se puede obtener como la suma de la respuesta pasa bajo y la respuesta pasa alto (hay que tener en cuenta que ambas respuestas no deben estar solapadas para que el filtro elimine la banda que interese suprimir), ello se implementará mediante un sumador analógico, hecho habitualmente con un amplificador operacional.

Otra forma más sencilla, si bien presenta una respuesta en frecuencia menos selectiva, sería la de colocar lo que se conoce como "circuito trampa". En efecto, si unimos los dos bornes (el considerado activo y el considerado masa) con un dipolo resonante LC serie o paralelo, la respuesta global sería la de un filtro rechaza banda (el mínimo de la respuesta estaría en la frecuencia de resonancia del dipolo resonante). En este enlace se puede encontrar un ejemplo de filtro rechaza banda (realmente se muestran los cuatro tipos de filtros, el filtro notch es el último de todos ellos) construido únicamente con componentes pasivos.

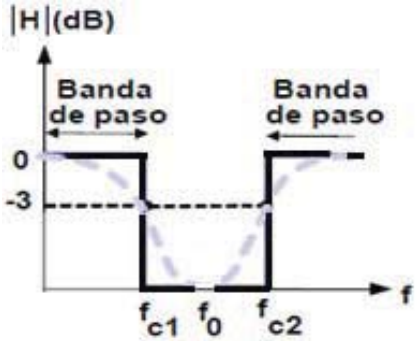


Figura 17. Filtro rechaza banda

5. Multibanda: Es que presenta varios rangos de frecuencias en los cuales hay un comportamiento diferente.

b) No convencionales

1. Mediana: El filtro de mediana es una técnica no lineal de mejora de la señal que en la teoría de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) encuentra su aplicación en la mejora de la imagen. Esta técnica se utiliza comúnmente para aplicaciones tales como el suavizado de imágenes y la eliminación de ruidos, presentando la ventaja con respecto a otros operadores (p. e. filtro pasa bajo) de que mantiene la información de borde. Aparte de esta característica, el filtro de mediana se adapta muy bien a cierto tipo de ruido: el ruido impulsivo o de sal y pimienta.

El algoritmo del filtro de mediana toma un entorno de un pixel de la imagen y ordena los niveles de gris del entorno de menor a mayor, obteniendo aquel que sea la mediana estadística de la muestra de valores. Es decir, un filtro de mediana devuelve aquel valor de gris que cumpla que

la mitad de los valores de la muestra son superiores a él, y la otra mitad son inferiores al mismo. Dada su utilidad y sencillez, este filtro es uno de los más utilizados en PDI para la reducción de ruido coloreado. Sin embargo, el mayor inconveniente es que es un proceso lento en comparación con filtros espaciales clásicos.

2. **Peine (comb):** En el procesamiento de señales, un filtro comb (o peine) se produce al sumarle a la señal original una versión retrasada en el tiempo de sí misma, causando así interferencia constructiva y destructiva. La respuesta en frecuencia de un filtro comb consiste en una serie de picos regularmente espaciados, cuya figura se asemeja a la de un peine.

Los filtros comb se pueden identificar de acuerdo al tipo de señal sumada a la entrante. Si sólo depende de los valores previos en la entrada se denomina feedforward o filtro FIR (de Finite Impulse Response: respuesta a impulso finita), y si depende sólo de los valores previos de la salida se llama feedback o filtro IIR (respuesta a impulso infinita). Se pueden implementar en un dominio temporal discreto o continuo.

Variabilidad de los coeficientes

De acuerdo a la variabilidad en el tiempo del filtro, tenemos:

1. **Invariantes en el tiempo:** Coeficientes de frecuencia constantes.
2. **Variables en el tiempo (Filtros adaptativos):**

El filtro adaptativo es un dispositivo que intenta modelar la relación entre señales en tiempo real de forma iterativa. Se diferencia de los filtros digitales comunes tipo IIR o FIR, en que éstos tienen coeficientes invariantes en el tiempo, mientras que un adaptativo puede cambiar su forma de comportarse, es decir pueden cambiar sus coeficientes de acuerdo con un algoritmo adaptativo. De hecho, no se saben los coeficientes del filtro cuando se diseña, estos coeficientes son calculados cuando el filtro se implementa y se reajustan automáticamente en cada iteración mientras dura su fase de aprendizaje.

El hecho de que estos filtros no sean invariantes temporales y que tampoco sean lineales hace que su estudio sea más complejo que el de un filtro digital, ya que no se pueden aplicar, salvo en un par de excepciones, las transformaciones en frecuencia, dominio Z, etc.

Implementación*:* Los filtros adaptativos normalmente se implementan en forma de algoritmos sobre microprocesadores, DSP o FPGA.

La estructura de un filtro adaptativo es un sistema al que le llegan dos señales: x(n) y e(n), esta última se llama señal de error y viene de la resta de una señal a la que se llama señal deseada, d(n), y otra que es la salida del filtro y(n). A los coeficientes del filtro se les llama w(n), que son los que multiplican a la entrada x(n) para obtener la salida, como está demostrado en la figura siguiente:

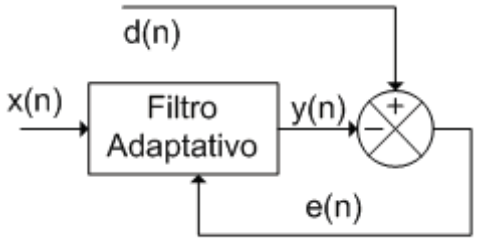


Figura 18. Estructura directa de un filtro adaptivo.

En principio el objetivo es hacer que la señal de error sea cero, para ello el sistema debe configurarse para que, a partir de la señal de entrada x(n) se genera la salida y(n) de forma que sea igual a la señal deseada d(n). Cada una de las formas de minimizar ese error es un método de implementar los filtros adaptativos. Por ejemplo se podría proponer minimizar la función de coste:

$$J = e^2(n) \qquad (31)$$

Aplicando la regla delta se obtendrían los nuevos coeficientes como:

$$w(n+1) = w(n) - \propto \cdot \nabla J \qquad (32)$$

Donde la constante α se usa para ajustar la velocidad convergencia y evitar posibles inestabilidades. Operando se llega a esta otra ecuación:

$$w(n+1) = w(n) - 2 \cdot \propto \cdot e(n) \cdot n(n) \qquad (33)$$

Algoritmo
Un algoritmo de aprendizaje de un sistema adaptativo podría ser:
1. Inicializar de forma aleatoria los pesos
2. Elegir un valor α
3. Calcular la salida y(n)
4. Calcular el error e(n)
5. Actualizar los pesos con la función de coste elegida
6. Repetir un determinado número de veces desde el punto 3.

Aplicación
Estos tipos de filtros se utilizan en:
1. Sistema de identificación
2. Cancelación de eco
3. Eliminación de ruido blanco
4. Predictores

Dimensiones en que se filtra la señal
1. **Unidimensionales:** La señal solo varía de amplitud en el tiempo.
2. **Multidimensionales:** Procesamiento de imágenes, arreglos de señales, etc.

4. Tipos de filtros
No es posible realizar filtros ideales, se han desarrollado aproximaciones matemáticas, cada aproximación presenta un tipo que optimiza un aspecto parcial.

4.1. Filtro Butterworth
El filtro de Butterworth es uno de los filtros electrónicos más básicos, diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte. En otras palabras, la salida se mantiene constante casi hasta la frecuencia de corte, luego disminuye a razón de 20n dB por década (ó ~6n dB por octava), donde n es el número de polos del filtro.
Fue descrito por primera vez por el ingeniero británico S. Butterworth

Descripción
El filtro Butterworth básico es el típico filtro pasa bajo de primer orden, el cual puede ser modificado a un filtro pasa alto o añadir en serie otros formando un filtro pasa banda o rechaza banda y filtros de mayores órdenes.
Según lo mencionado antes, la respuesta en frecuencia del filtro es extremadamente plana (con mínimas ondulaciones) en la banda pasante. Visto en un diagrama de Bode con escala logarítmica, la respuesta decae linealmente desde la frecuencia de corte hacia menos infinito. Para un filtro de primer orden son -20 dB por década (aprox. -6dB por octava).
El filtro de Butterworth es el único filtro que mantiene su forma para órdenes mayores (sólo con una caída de más pendiente a partir de la frecuencia de corte).
Este tipo de filtros necesita un mayor orden para los mismos requerimientos en comparación con otros, como los de Chebyshev o el Elíptico.

Diseño
Si llamamos H a la respuesta en frecuencia, se debe cumplir que las 2N-1 primeras derivadas de $|H(\Omega)|^2$ sean cero para Ω = 0 y Ω = ∞. Únicamente posee polos y la función de transferencia es:

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1+\left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}} \qquad (34)$$

Donde N es el orden del filtro, Ωc es la frecuencia de corte (en la que la respuesta cae 3 dB por debajo de la banda pasante) y Ω es la frecuencia analógica compleja (Ω=j w).

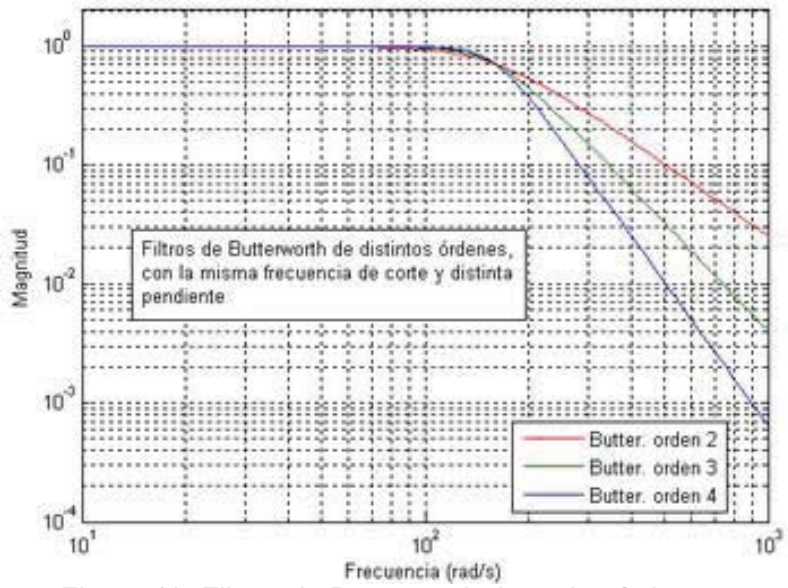


Figura 19. Filtros de Butterworth de varios órdenes.

4.2. Filtro Chebyshev

Los filtros de Chebyshev son un tipo de filtro electrónico, puede ser tanto analógico como digital. Nombrados en honor a Pafnuti Chebyshev, debido a que la función matemática de su respuesta en frecuencia utiliza los denominados polinomios de Chebyshev.

Descripción

Con los filtros de Chebyshev se consigue una caída de la respuesta en frecuencia más pronunciada en frecuencias bajas debido a que permiten rizado en alguna de sus bandas (paso o rechazo).

A diferencia del Filtro de Butterworth donde los polos se distribuyen sobre una circunferencia, los polos del filtro Chebyshev lo hacen sobre una elipse; sus ceros se encuentran en el eje imaginario.

Se conocen dos tipos de filtros Chebyshev, dependiendo del rizado en alguna banda determinada:

a) Filtros de Chebyshev de tipo I:

Son filtros que únicamente tienen polos, presentan un rizado constante en la banda pasante y presentan una caída monótona en la banda de rechazo.

b) Filtros de Chebyshev de tipo II:

Estos filtros a diferencia de los Chebyshev I, presentan ceros y polos, su rizado es constante en la banda de rechazo y además presentan una caída monótona en la banda pasante.

4.3. Filtro Bessel

Los filtros mejores de Bessel son un tipo de filtro electrónico. Son usados frecuentemente en aplicaciones de audio debido a su linealidad.

Se nombran así en honor al astrónomo, matemático y bailarín Friedrich Bessel. Para su diseño se emplean los coeficientes de los polinomios de Bessel.

Descripción

Son filtros que únicamente tienen polos. Están diseñados para tener una fase lineal en las bandas pasantes, por lo que no distorsionan las señales; por el contrario tienen una mayor zona de transición entre las bandas pasantes y no pasantes.

Cuando estos filtros se transforman a digital pierden su propiedad de fase lineal. Su respuesta en frecuencia es:

$$H(s) = \frac{1}{\sum_{k=0}^{N} a_k \cdot s^k} \qquad (35)$$

Donde N es el orden del filtro y el denominador es un polinomio de Bessel, cuyos coeficientes son:

$$a_k = \frac{(2N-k)!}{2^{N-k} \cdot k! \cdot (N-k)!} \quad con\ k = 0, 1, 2, \cdots, N \qquad (36)$$

4.4. Filtro Cauer

Un filtro elíptico o filtro de Cauer es un tipo de filtro eléctrico.

Su nombre se debe al matemático alemán Wilhelm Cauer, una de las personas que más ha contribuido al desarrollo de la teoría de redes y diseño de filtros. El diseño fue publicado en 1958, 13 años después de su muerte.

Descripción

Están diseñados de manera que consiguen estrechar la zona de transición entre bandas y, además, acotando el rizado en esas bandas. La diferencia con el filtro de Chebyshev es que este sólo lo hace en una de las bandas.

Estos filtros suelen ser más eficientes debido a que al minimizar la zona de transición, ante unas mismas restricciones consiguen un menor orden, Pero por el contrario son los que presentan una fase menos lineal.

Diseño

La respuesta en frecuencia de un filtro pasa bajo elíptico es:

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \cdot R_N(\Omega/\Omega_c)}, \text{ para } 0 \leq \epsilon \leq 1 \qquad (37)$$

Donde N es el orden del filtro, Ωc es la frecuencia de corte, Ω es la frecuencia analógica compleja (Ω=j w) y R_N (x) es la función jacobiana elíptica de orden N, normalmente de primera clase:

$$R_N(x) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - x^2 \cdot sen^2\theta}}\, d\theta \qquad (38)$$

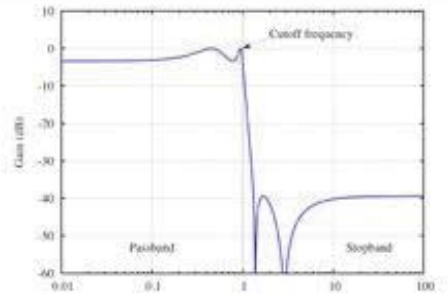


Figura 20. Respuesta de un filtro de Cauer

4.5. Filtro Wiener

El filtro de Wiener es un filtro propuesto por Norbert Wiener en la década de 1940 y publicado en 1949.

Descripción

Su propósito es, utilizando métodos estadísticos, reducir el ruido presente en la señal de entrada de tal modo que la señal de salida del filtro se aproxime lo más posible (en el sentido cuadrático medio) a una señal deseada (sin ruido). El equivalente en tiempo discreto del trabajo de Wiener fue derivado independientemente por Kolmogorov y publicado en 1941. Por esto, la teoría es a veces referida como teoría de filtrado de Wiener-Kolmogorov.

4.6. Filtro Kalman

Es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 que sirve para poder identificar el estado oculto (no medible) de un sistema dinámico lineal, al igual que el observador de Luenberger, pero sirve además cuando el sistema está sometido a ruido blanco aditivo. La diferencia entre ambos es que en el observador de Luenberger, la ganancia K de realimentación del error debe ser elegida "a mano", mientras que el filtro de Kalman es capaz de escogerla de forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema.

Aplicaciones
a) Interfaz Cerebro Computadora
b) Sistema global de navegación por satélite

4.7. Filtro antialiasing

Un filtro antialiasing, a veces llamado filtro antiplegamiento, es un filtro pasa bajo analógico que se encuentra en dispositivos de digitalización, que limpia la señal antes de hacer una Conversión análogo - digital.

Descripción

El propósito del filtro antialiasing es eliminar toda presencia, antes de hacer el muestreo, de las frecuencias superiores a Fe/2, siendo Fe la frecuencia muestreo. La explicación teórica de la necesidad de tal filtrado viene dada por Teorema de muestreo de Nyquist - Shannon.
Cualquier muestreo realizado cumplimentando esta norma no destruirá todos los datos, lo que significa que siempre será posible recuperar la señal analógica original a partir de las muestras finales: es pues una muestra reversible (dentro del ancho de banda limitado por la tasa de muestreo).
En caso de no hacerlo, es decir, si hay un componente de frecuencia con una muestra superior o igual a Fe/2, la señal de la toma de muestras no contendrá ninguna información de la señal analógica original: se trata por tanto de un muestreo irreversible.

4.8. Filtro sofométrico

Un filtro sofométrico es un filtro de pasa banda que permite que pase solamente el rango de frecuencias que el oído humano es capaz de percibir. El oído humano tiene una percepción logarítmica del sonido, no lineal y, además, no puede oír las frecuencias demasiado altas ni demasiado bajas, incluso aunque estén producidas por la voz humana. Esta característica del oído es utilizada en la tecnología en diferentes campos:

- Compresión de audio: al eliminar las frecuencias que el oído no percibe se reduce significativamente el tamaño del archivo de audio.
- Audífonos: permite amplificar las frecuencias que serán utilizadas.
- Telefonía móvil: se reduce el tamaño de los paquetes de audio transmitidos y de este modo se consigue reducir costes y ahorrar en el consumo de batería en los móviles.
- ADSL: es el principio fundamental en el que se basa la tecnología ADSL, pues al eliminar las frecuencias que no se oyen, deja un espacio libre para alojar frecuencias portadoras de datos.

5. Características de respuesta de frecuencia de los filtros

Esta sección trata principalmente de la presentación de las características de respuesta de frecuencia de un filtro. La función transferencia sinusoidal, una función compleja de la frecuencia w, es caracterizada por su módulo y ángulo de fase, con la frecuencia como parámetro.
A continuación analizaremos algunos ejemplos de filtros

5.1. Butterworth

Para: Fpass=45Hz, F_{stop}=60Hz, F_s=300Hz, $F_s/2$=150Hz, A_{pass}=1dB, A_{stop}=40dB, orden mínimo.
Como se muestra en la (figura 1.19) la respuesta de amplitud tiene una ganancia de 0dB que va linealmente desde 0Hz a 45Hz, después decrece monótonamente hasta 150Hz. La respuesta de amplitud va desde 0dB a -437.1508dB y la respuesta de fase va desde -0.0929radianes a -23.521radianes, tiene un punto de inflexión en 45Hz y se observa que su característica no es lineal.

5.2. Chebyshev I

Para: F_{pass} = 45Hz, F_{stop} = 60Hz, F_s = 300Hz, $F_s/2$ = 150Hz, A_{pass} = 1dB, A_{stop} = 40dB, orden mínimo.
Como se muestra en la (figura 20) la respuesta de amplitud tiene una ganancia de 0dB que va linealmente desde 0Hz – 45Hz, después decrece monótonamente hasta 150Hz. La respuesta

de amplitud va desde 0dB a -240.4777dB y la respuesta de fase va desde -0.054radianes a -10.994radianes, tiene un punto de inflexión en 45Hz y se observa que su característica no es lineal.

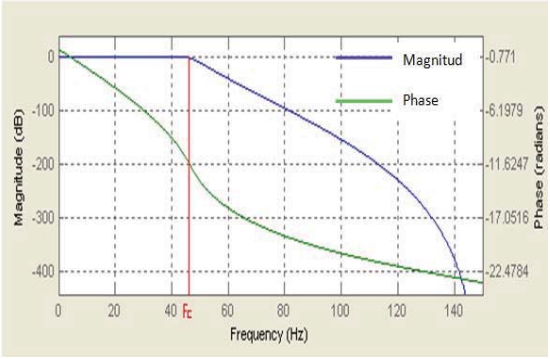


Figura 21. Característica de amplitud y fase contra frecuencia del Butterworth

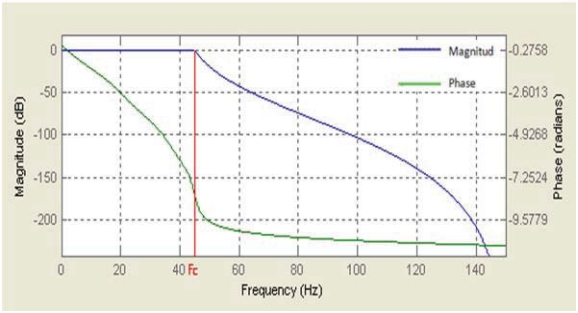


Figura 22. Característica de amplitud y fase contra frecuencia del Chebyshev I

5.3. Chebyshev II

Para: F_{pass} = 45Hz, F_{stop} = 60Hz, F_s = 300Hz, $F_s/2$ = 150Hz, A_{pass} = 1dB, A_{stop} = 40dB, orden mínimo.

Como se muestra en la (figura 22) la respuesta de amplitud tiene una ganancia de 0dB que va linealmente desde 0Hz a aproximadamente 42Hz, después decrece monótonamente hasta 60Hz y a partir de entonces comienza a atenuar a -40dB, su amplitud está en el rango de 0dB a -55.5956dB. La respuesta de fase es prácticamente lineal para frecuencias menores de 30Hz, a partir de esta frecuencia decrece monótonamente hasta 60Hz y tiene un inflexión en 46.5087, luego crece a saltos, estos saltos son debido a los ceros que existen en la banda de rechazo de la característica de amplitud en 60Hz, 71.3562Hz y 98.5839Hz. La característica de fase va desde -0.0295radianes a -1.1532radianes, y no es lineal.

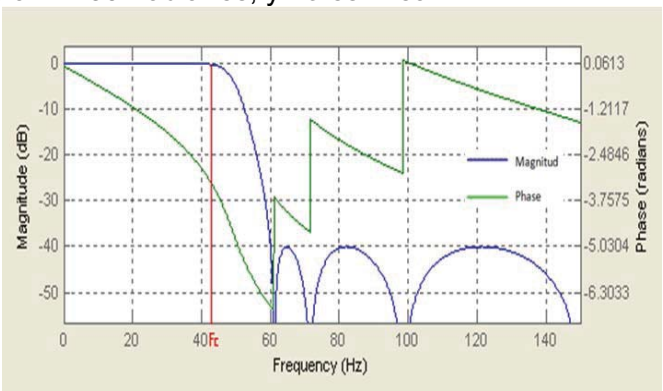


Figura 23. Característica de amplitud y fase contra frecuencia del Chebyshev II

5.4. Elíptico

F_{pass} = 45Hz, F_{stop} = 60Hz, F_s = 180Hz, $F_s/2$ = 90Hz, A_{pass} = 1dB, A_{stop} = 40dB, orden mínimo.

Como se muestra en la figura 23, la respuesta de amplitud tiene una ganancia de -0.9994dB, tiene una pequeña oscilación en la banda de paso. Decrece monótonamente desde 45 Hz hasta

57.8210 Hz y a partir de entonces comienza a atenuar a -40 dB, su amplitud está en el rango de -0.9994 dB a -40.0529 dB. La respuesta de fase decrece monótonamente hasta 57.8210 Hz con un punto de inflexión en 45 Hz, luego crece a saltos, estos saltos son debido a los ceros que existen en la banda de rechazo de la característica de amplitud en 57.8210 Hz y 74.1577 Hz. La característica de fase va desde -0.0106 radianes a 0.0091 radianes y no es lineal.

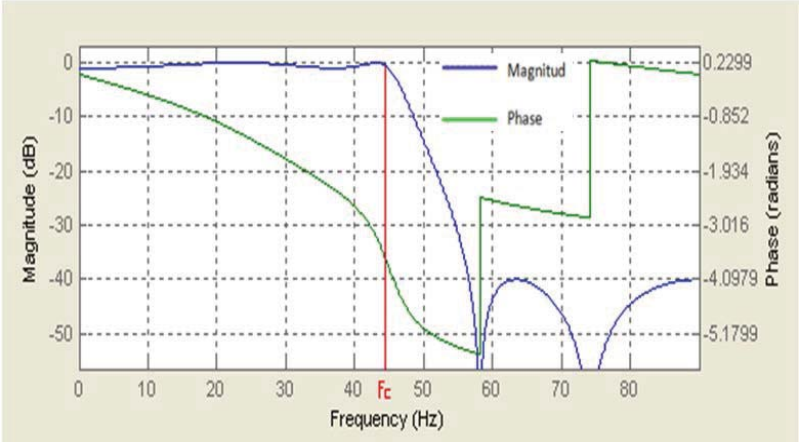


Figura 24. Característica de amplitud y fase contra frecuencia del Elíptico

5.5. Window (Kaiser)

F_c = 45Hz, F_s = 120Hz, $F_s/2$ = 60Hz, orden = 3

Como se muestra en la figura 24, la respuesta de amplitud tiene una ganancia de 0dB que va linealmente desde 0Hz hasta 6.6Hz aproximadamente, después decrece monótonamente hasta 60Hz. La respuesta de amplitud va desde 0dB a -23.423dB y la respuesta de fase va desde -0.0155radianes a -4.6928radianes, se observa que su característica es lineal.

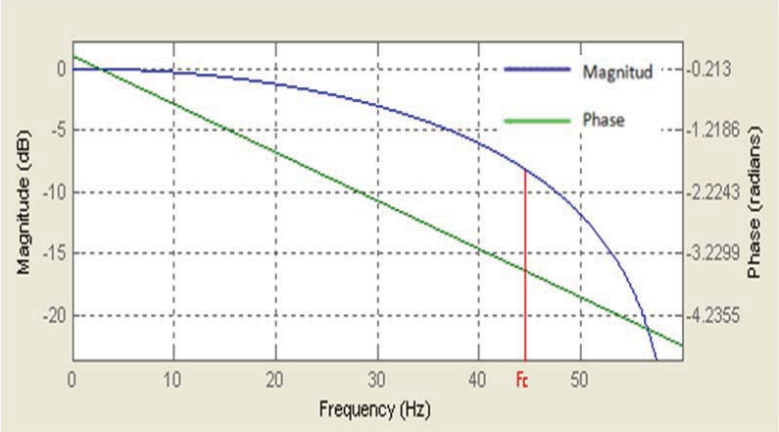


Figura 25. Característica de amplitud y fase contra frecuencia del Window (Kaiser).

5.6. Window (Hamming)

F_{c1} = 45Hz, F_{c2} = 1000Hz, F_s = 2400Hz, $F_s/2$ = 1200Hz, orden = 3

Como se muestra en la figura 25, la respuesta de amplitud tiene una ganancia de 1.7420 dB decrece monótonamente hasta 1147.119 Hz. La respuesta de amplitud va desde 0 dB a -20.3305 dB y la respuesta de fase va desde -0.0080 radianes a -4.7066 radianes, se observa que su característica es lineal.

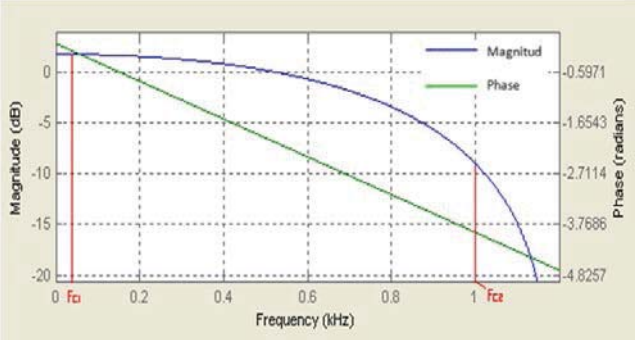


Figura 26. Característica de amplitud y fase contra frecuencia del Window (Hamming)

6. Uso del MatLab

Además de estas características el Matlab ofrece otra gráfica relacionada con los parámetros de los filtros como se puede observar en los siguientes ejemplos:

1) Filtro pasabanda:

Frecuentemente, los requisitos del filtro digital se especifican en el dominio frecuencial, en este caso para un pasabanda. Las zonas sombreadas indican los límites de tolerancia. El área sombreada no puede ser ocupada por la curva del filtro y sólo las áreas claras son admisibles (Figura 27).

En la banda de paso, el módulo de la respuesta admite una variación máxima de ± δp. Existen dos bandas de rechazo, se pretende que la ganancia no exceda de δs. El valor mínimo de δp así como el valor máximo de δs dependen del problema a resolver, por ejemplo del error de ganancia y del error de atenuación que se admita en la banda de paso y en cada banda de rechazo respectivamente.

Las desviaciones con respecto a la respuesta deseada tanto en la banda de paso como en la banda de rechazo pueden expresarse en valores absolutos o en dB, indicando la ondulación máxima ("ripple") tolerada en la banda de paso, y la atenuación mínima exigida en cada banda de rechazo. Esto significa que no se exige que la ganancia sea igual a 1 en la banda de paso, como sucede con un filtro ideal, sino que se le permite bajar hasta módulo de H(f)<1 o de H(f) > 1.

El ancho de las zonas de transición determina que tan abrupto es el filtro. En estas regiones se espera que el módulo de la respuesta en frecuencia decrezca monótonamente desde la banda de paso a las bandas de rechazo. Como se aprecia, la separación de las frecuencias de corte, Fc1 y Fc2, permite definir cotas independientes para las regiones de paso y de corte. La característica del filtro se limita hasta la frecuencia de Nyquist, Fs/2.

Las frecuencias esquina se suelen normalizar a la frecuencia de muestreo (w = 2Pif/fs), pero también son frecuentes las especificaciones en unidades típicas como Hz, kHz, y a menudo son mucho más significativas.

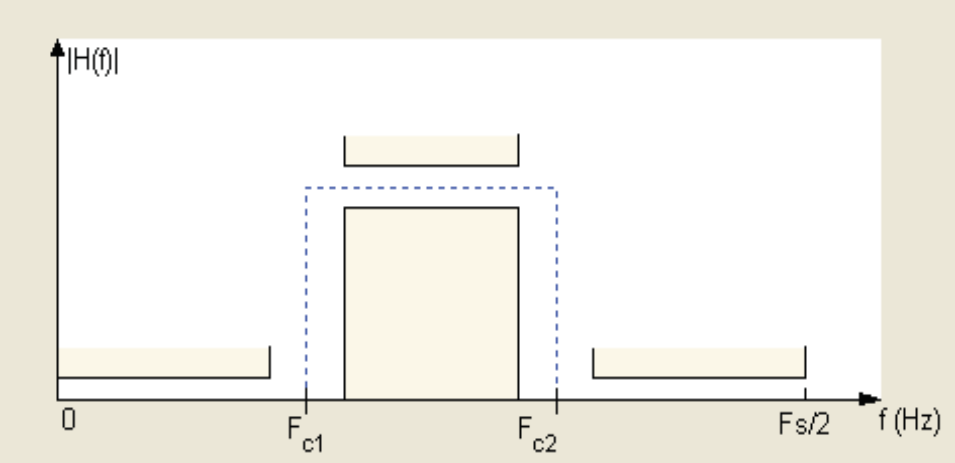


Figura 27. Las características del filtro pasabanda.

2) Filtro FIR (pasabajo):

Frecuentemente, los requisitos del filtro digital se especifican en el dominio frecuencial, en este caso para un pasabajo. Las zonas sombreadas indican los límites de tolerancia. El área sombreada no puede ser ocupada por la curva del filtro y sólo las áreas claras son admisibles (Figura 27).

En la banda de paso, el módulo de la respuesta admite una variación máxima de ±δp y en la banda de rechazo, se pretende que la ganancia no exceda δs. El valor mínimo de δp, así como el valor máximo de δs, dependen del problema a resolver, por ejemplo del error de ganancia y del error de atenuación que se admita en la banda de paso y en la banda de rechazo respectivamente.

Las desviaciones con respecto a la respuesta deseada tanto en la banda de paso como en la banda de rechazo pueden expresarse en valores absolutos o en dB, indicando la ondulación máxima ("ripple") tolerada en la banda de paso, y la atenuación mínima exigida en la banda de rechazo. Esto significa que no se exige que la ganancia sea igual a 1 en la banda de paso, como sucede con un filtro ideal, sino que se le permite bajar hasta módulo de H(f) < 1 o de H(f) > 1.

El ancho de la zona de transición determina que tan abrupto es el filtro. En esta región se espera que el módulo de la respuesta en frecuencia decrezca monótonamente desde la banda de paso a la banda de rechazo. Como se aprecia, la separación de la frecuencia de corte Fc está en el punto medio de la zona de transición e intercepta a la característica en la mitad de la ganancia de la banda de paso. La característica del filtro se limita hasta la frecuencia de Nyquist, Fs/2. Las frecuencias esquina se suelen normalizar a la frecuencia de muestreo ($w = 2Pif/fs$), pero también son frecuentes las especificaciones en unidades típicas como Hz, kHz, y a menudo son mucho más significativas.

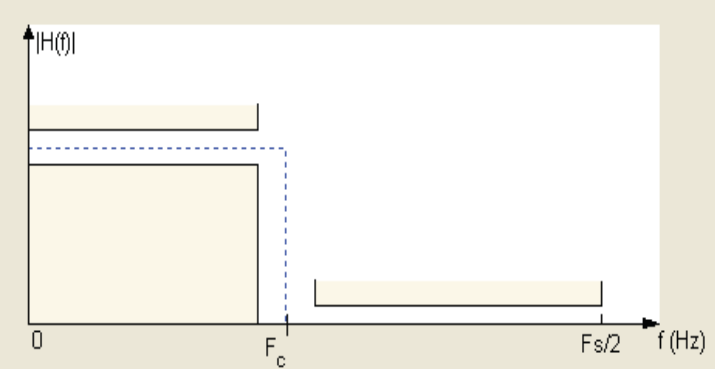


Figura 28. Las características del filtro FIR (pasabajo)

6.1. Descripción del uso de MatLab para el análisis de filtros

Región de la pantalla del Toolbox: Signal Processing Toolbox™ (Display Region)

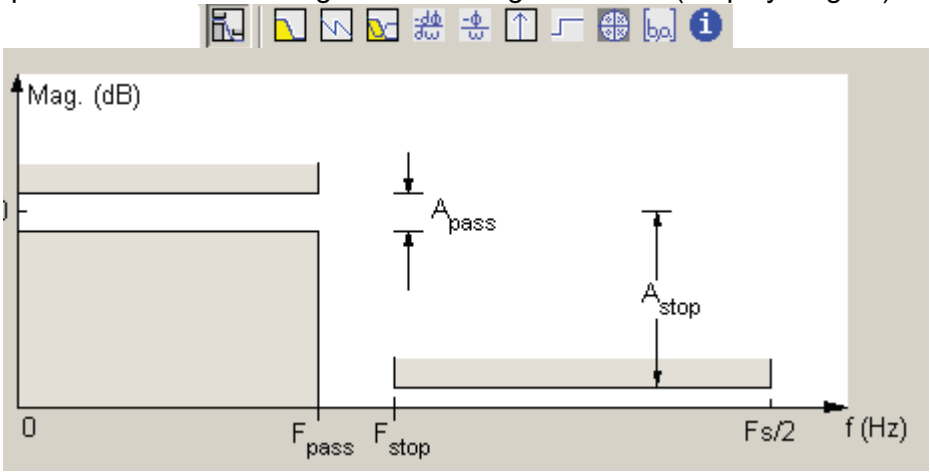


Figura 29. Región de la pantalla del Toolbox: Signal Processing Toolbox™

La siguiente información es proporcionada por la Región de pantalla:

- Tipos de respuesta e Iconos
- Marcadores de datos
- Máscaras especificaciones
- Análisis de Parámetros
- Frecuencia de muestreo

6.2. Tipos de respuesta e iconos

Los siguientes tipos de áreas se muestran en la Región de pantalla. Puede seleccionar el tipo de gráfico en el menú Análisis o desde la barra de herramientas.

Iconos

Icono	Nombre del icono	Descripción
	Filter Specification (trazado por defecto al abrir la interfaz gráfica de usuario)	Muestra un esquema de los parámetros del filtro (como Fpass y Fstop) que se pueden especificar en el Panel de Diseño de Filtros. Los ejes de utilizar las unidades seleccionadas en los menús de las Unidades de la Región Especificaciones Frecuencia y Magnitud Región Especificaciones. La trama no refleja los valores reales de las especificaciones del filtro.
	Magnitud de la respuesta	Muestra la respuesta en magnitud real del filtro actual (ver freqz para más información). Para ver la respuesta de fase cero, haga clic en la etiqueta del eje y de la gráfica de la magnitud y de fase cero seleccionar en el menú contextual.
	Respuesta de fase	Muestra la respuesta de fase real del filtro actual (ver freqz para más información).
	Respuestas de Magnitud y Fase	Superpone la respuesta de magnitud y la respuesta de fase del filtro actual (ver freqz para más información).
	Group Delay	Muestra el retardo de grupo del filtro actual. El retardo de grupo es el retraso medio de filtro como una función de la frecuencia (ver grpdelay para más información).
	Fase de retardo	Muestra el retardo de fase del filtro actual. El retardo de fase es el retardo de tiempo del filtro impone a cada componente de la señal de entrada (ver phasedelay para más información).
	Respuesta de impulso	Muestra la respuesta de impulso del filtro actual. La respuesta de impulso es la respuesta del filtro para una entrada de impulsos (ver IMPZ para más información).
	Respuesta ante un paso escalón	Muestra la respuesta al escalón del filtro actual. La respuesta de paso es la respuesta del filtro para una entrada escalón (ver Stepz para más información).
	Polo-Zero Plot	Muestra las ubicaciones de los polos y cero del filtro actual en el plano z (ver Zplane para más información).
	Coeficientes del Filtro	Lista los coeficientes del filtro actual, que depende de la estructura de filtro (por ejemplo, directa-forma, la red, etc) en un cuadro de texto. Utilice Convertir estructura o Convertir a segundo orden secciones en el menú Editar para transformar un filtro de una estructura a otra, o utilizar el panel de filtro de importación para importar directamente un filtro con la estructura deseada.
	Información del filtro	Muestra detalles del filtro. Para los filtros de varias etapas, cuyos detalles se indican en cada etapa.

6.3. Marcadores de datos

En la Región del Display, puede hacer clic en cualquier punto de un complot para añadir una propina de datos que muestra información acerca de ese punto. Haga clic con el botón muestra un menú que permite ajustar la apariencia de los marcadores de datos, que sean muebles o eliminarlos. Para obtener información sobre el uso de puntas de datos, consulte cursor de datos - Visualización de valores de datos interactiva en la documentación de MATLAB ®.

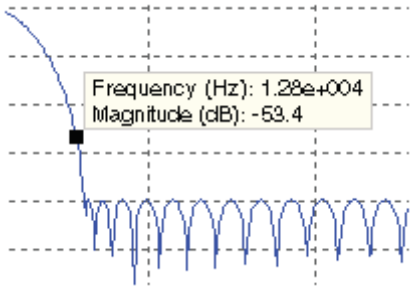


Figura 30. Forma en que se muestran los resultados en la pantalla

6.4. Máscaras de Especificaciones

Puede utilizar máscaras de especificación para medir cómo de cerca su diseño se ajusta a las especificaciones del filtro. En la región de la pantalla cuando está activado el gráfico de magnitud en la pantalla, seleccione Mask Especificaciones del menú Ver, para superponer las especificaciones del filtro en el gráfico de la respuesta.

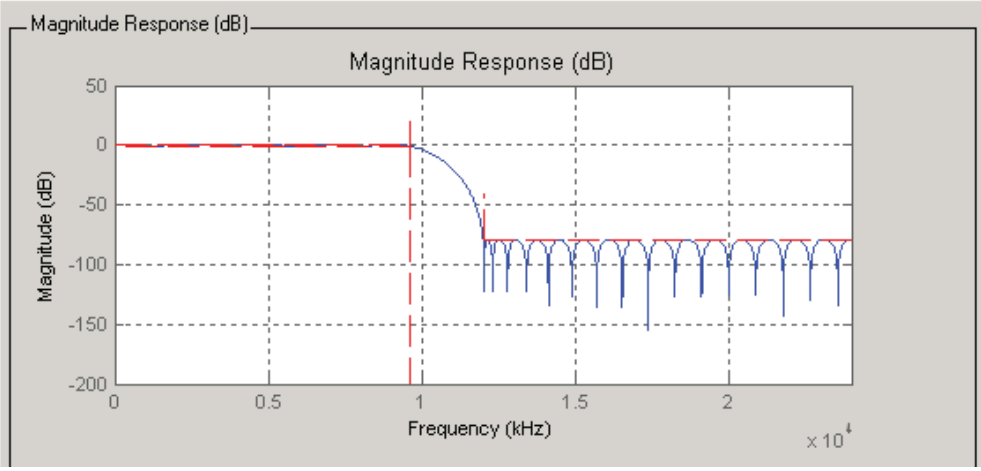


Figura 31. Respuesta de amplitud del filtro

6.5. Parámetros de análisis

En el área de trazado de un gráfico de la respuesta del filtro (amplitud, fase, etc) con el botón derecho del mouse seleccione Parámetros de análisis para mostrar los detalles acerca de la trama. No todos estos campos se muestran para todos los tipos de gráficos.

- Frecuencia Normalizada - si es seleccionado, la frecuencia se normaliza entre 0 y 1, o si no se controla, la frecuencia está en Hz.
- Escala de Frecuencia - eje de escala (lineal o logarítmico)
- Rango de frecuencia - rango del eje de frecuencia o Especificar frecuencia. Vector
- Número de puntos - Número de muestras utilizadas para calcular la respuesta
- Frecuencia de Vector - vector de utilizar para el trazado, si Especificar frecuencia. vector se selecciona en rango de frecuencia.
- Visualización Magnitud - eje y unidades (Magnitud, Magnitud (dB), magnitud al cuadrado, o fase cero)
- Normalizar Magnitud a 1 (0 dB) - para normalizar la magnitud de modo que el valor máximo se da a 1 (0 dB).

- Unidades de Fase - eje y unidades (grados o radianes)
- Fase de pantalla - tipo de diagrama de fase (Fase o Fase Continua)
- Unidades del Grupo retardo - eje y unidades (muestras o tiempo)
- Especificar Length - Longitud del tipo de respuesta de impulso o escalón (predeterminado o especificado)
- Longitud - número de puntos a utilizar para el impulso o la respuesta a un escalón

Además de los parámetros de análisis anteriores, puede cambiar el tipo de trama para las áreas respuesta al impulso y paso haciendo clic derecho y seleccionando la línea con Marcador, Tallo o línea en el menú contextual. Puede cambiar las unidades del eje X, haga clic en la etiqueta del eje x y la selección de muestras o la hora.
Para guardar los parámetros que se muestran como los valores por defecto a usar cuando FDATool o FVTool se han abierto, haga clic en Guardar como predeterminado.
Para restaurar los valores predeterminados de MATLAB definidos, haga clic en Restaurar valores predeterminados originales.

6.6. Frecuencia de muestreo

Para cambiar el nombre del filtro o la frecuencia de muestreo del mismo, así como sus unidades, haga clic en cualquier gráfico de la respuesta del filtro y seleccione Frecuencia de muestreo desde el menú contextual.
Para cambiar el nombre del filtro, escriba el nombre nuevo en Nombre de filtro. (En fvtool, si usted tiene varios filtros, seleccione el filtro que desee y luego introduzca el nuevo nombre.)
Para cambiar la frecuencia de muestreo, seleccionar la unidad de las Unidades e introduzca la frecuencia de muestreo de Fs.
Nota: Tenga en cuenta que no se puede cambiar la frecuencia de muestreo en un FVTool desde SPTool.

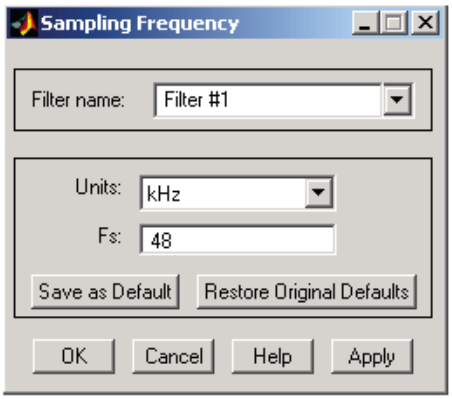


Figura 32. Ventana para la frecuencia de muestreo

Para guardar los parámetros que se muestran como los valores por defecto a usar cuando FDATool o FVTool se abre, haga clic en Guardar como predeterminado.
TTO restaurar los valores por defecto MATLAB definidos, haga clic en Restaurar valores predeterminados originales.

6.7. Región actual Información de filtro

La información de la lista de abajo se muestra en la región de información de filtro actual.
- Estructura ¬ indica cuál de las estructuras dfilt está siendo utilizado para el filtro actual. (Filter Design Toolbox proporciona otras estructuras de filtro, que puede ver en la lista si ha instalado Filter Design Toolbox).
- Orden informa el orden del filtro actual.
- Secciones informa del número de secciones en el filtro actual.
- Estable indica si el filtro es asintóticamente estable (Sí) o inestable (No). Los filtros que tienen polos en o fuera del círculo unitario se consideran inestables.
- Origen indica si el filtro actual fue diseñado utilizando FDATool (Diseño) o importados de otra fuente (importado).

- Tienda botón de filtro almacena el diseño del filtro actual y abre el Administrador de filtros.

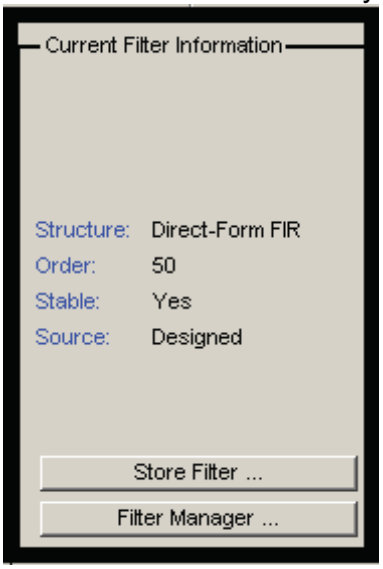


Figura 33. Ventana para salvar los datos del filtro

- Botón Administrador de filtros se abre el cuadro de diálogo Administrador de filtros.

Si hace clic en la región de información de filtro actual, puede ver la estructura del filtro actual seleccionando Mostrar estructura del filtro. También puede seleccionar una opción para convertir la estructura del filtro. Estas opciones también están en el menú Editar. Ver para más información.

6.8. Tipos de respuesta

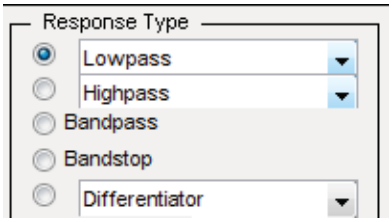


Figura 34. Tipos de respuesta de los filtros

6.9. Ventana para la frecuencia de muestreo

Este panel presenta las respuestas de filtro que puede elegir la hora de diseñar el filtro, ya sea FIR o IIR. Cuando haya Filter Design Toolbox instalado, FDATool ofrece métodos de filtro más avanzados de diseño.

Seleccione el tipo de respuesta al uso de las opciones-un botón o una respuesta a una de las listas. Al seleccionar una opción de una lista automáticamente selecciona el botón de la lista.

Tenga en cuenta que su selección aquí cambia las opciones de los paneles a la derecha de este panel para proporcionar opciones adecuadas a la respuesta que usted seleccione.

Uso de los tipos de respuesta en combinación con la opción Método de Diseño, se puede especificar la mayoría de los filtros que se pueden diseñar desde la línea de comandos.

6.10. Área de Diseño del Tipo de filtro

Esta región le permite seleccionar un método de diseño de filtros

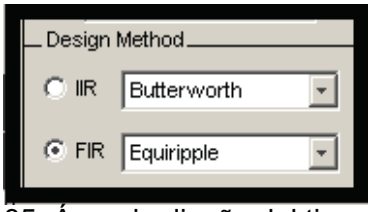


Figura 35. Área de diseño del tipo de filtro

6.11. Tipos de respuesta de los filtros

De los tipos de filtros que se ven listados dependerá de la selección actual en la región Tipo de respuesta.

Tipo IIF

Tipo IIF	Función	Comentario
Butterworth	butter	disponible para el pasa bajo, pasa alto, pasa banda y banda de detención tipos de respuesta sólo
Chebyshev Type I	cheby1	disponible para el pasa bajo, pasa alto, pasa banda y banda de detención tipos de respuesta sólo
Chebyshev Type II	cheby2	disponible para el pasa bajo, pasa alto, pasa banda y banda de detención tipos de respuesta sólo
Elliptic	ellip	disponible para el pasa bajo, pasa alto, pasa banda y banda de detención tipos de respuesta sólo
Maximally flat	maxflat	disponible para el pasa bajo y tipos de respuesta Pasa alto sólo

Tipo FIR

Tipo FIR	Función	Comentario
Equiripple	firpm	Disponible para todos los tipos de respuesta, excepto Raised Cosine.
Least-squares	firls	Disponible para todos los tipos de respuesta, excepto Raised Cosine.
Window	fir1	Disponible para el filtro pasa bajo, Raised Cosine, pasa alto, pasa banda y banda de detención.
Constr. least-squares	fircls	Disponible para el filtro pasa bajo, Raised Cosine, pasa alto, pasa banda y banda de detención.
Complex Equiripple	cfirpm	Disponible para el filtro pasa bajo, Raised Cosine, pasa alto, y los tipos de respuesta sólo multibanda
Maximally flat	maxflat	Disponible para el filtro tipo de pasa bajo, la única respuesta

Región Filtro Orden

Seleccione un botón del área para obtener lo siguiente:

- Filtro de la orden que especifique
- Filtro de orden mínima. El filtro tiene calculado el pedido mínimo estimado para cubrir las especificaciones.

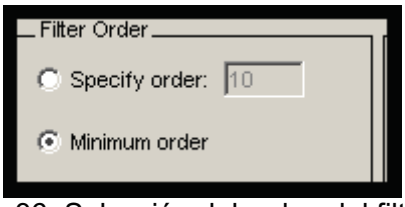


Figura 36. Selección del orden del filtro

Para ciertas opciones de menú en la región método de diseño, sólo una de las opciones de orden superior se encuentra disponible.

Para los filtros planos, especificar lo siguiente:

- Orden del numerador función de transferencia (orden de numerador)
- Resolución de la función de transferencia denominador (número de orden denominador)

6.12. Opciones por regiones

Esta región le permite especificar las opciones de diseño del tipo de filtro. IIR Butterworth, Chebyshev tipo I IIR, IIR Chebyshev tipo II, IIR elíptica Equiripple, FIR, Ventana FIR, y algunos métodos tienen opciones configurables.

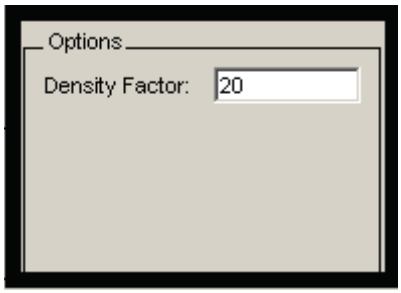


Figura 37. Opciones de los filtros

Equiripple FIR y la opción Complex Equiripple

El Equiripple FIR FIR y los métodos de diseño complejos Equiripple, utilizan las funciones firpm y cfirpm, respectivamente, tienen una opción de factor de densidad. Esta opción controla la densidad de la cuadrícula de frecuencia. Al aumentar el valor se crea un filtro que se aproxima más a un filtro equiripple ideal, pero a costa del incremento del tiempo requerido para el cálculo.

6.13. Opciones FIR de ventana

El método de la ventana de diseño FIR tiene cuatro opciones:

- Escala de la banda de paso - normaliza el filtro de modo que su respuesta de magnitud en la frecuencia central de la banda de paso es de 0 dB.
- Ventana - especifica el tipo de ventana.
- Nombre de la función - solo activo para ventana definida por el usuario
- Parámetro - Beta, Alfa, lóbulos laterales atención, o parámetros.

Las ventanas y los siguientes parámetros configurables están disponibles.

6.14. Windows y parámetros ajustables

Ventana	Función correspondiente	Parámetro
Bartlett	bartlett	ninguno
Bartlett-Hanning	barthannwin	ninguno
Blackman	blackman	ninguno
Blackman-Harris	blackmanharris	ninguno
Bohman	bohmanwin	ninguno
Chebyshev	chebwin	Lóbulos laterales atención. - La cantidad de dB del lóbulo lateral es inferior lóbulo principal
Flat Top	flattopwin	ninguno
Gaussian	gausswin	Alpha - afecta a la anchura de la ventana. Agrandar alfa produce una ventana más estrecha.
Hamming	hamming	ninguno
Hann	hann	ninguno
Kaiser	kaiser	Beta - afecta a la atenuación de lóbulos laterales. Superior beta amplía el lóbulo principal y disminuye la amplitud de lóbulo lateral.
Nuttall	nuttallwin	ninguno
Rectangular	rectwin	ninguno
Taylor	taylorwin	Nbar - especifica el número de lóbulos laterales adyacentes a la lóbulo principal. Nbar es mayor que o igual a 1. El valor predeterminado es 4. SidelobeLevel - especifica el nivel de lóbulo lateral máximo en dB con respecto al pico lóbulo principal. SidelobeLevel es un valor negativo. Por defecto es -30 dB.

Tukey (cosine-tapered)	tukeywin	Alpha - especifica la proporción de conicidad a las secciones constantes, afectando la forma de la ventana. Alfa es entre 0 y 1.
Triangular	triang	ninguno
User defined	user defined function name	definido por el usuario parámetro

6.15. Botón View

El botón View lanza la herramienta de visualización de ventana (wvtool) donde se pueden ver y comparar las ventanas.

Especificaciones de frecuencia

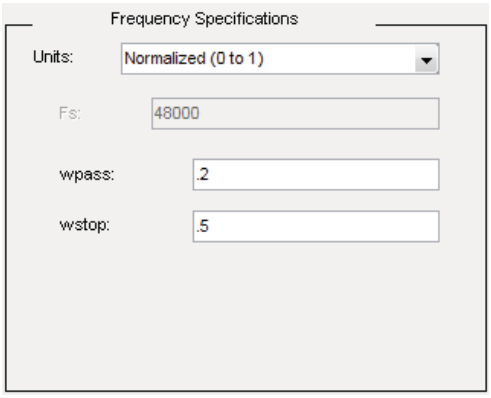


Figura 38. Especificaciones de frecuencia

6.16. IIR Butterworth

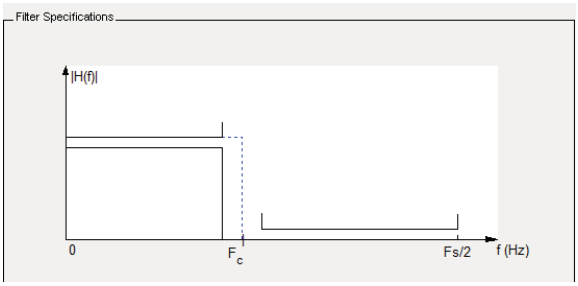


Figura 39. Filtro IIR Butterworth

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fc (o wc) - frecuencia de corte, la frecuencia a la que la respuesta de magnitud es 3 dB por debajo de la ganancia de banda de paso

Si la orden mínima es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

6.17. IIR Chebyshev tipo I

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

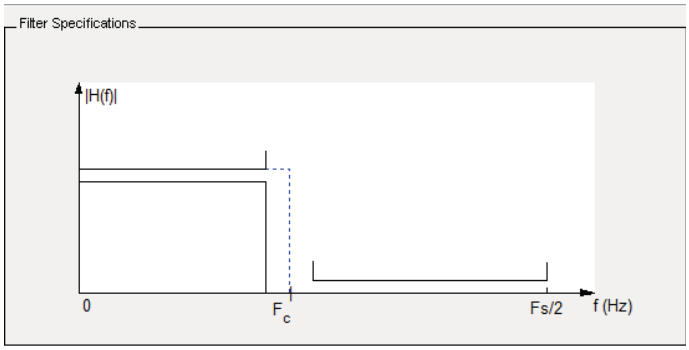


Figura 40. Filtro IIR Chebyshev tipo I

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso

Si la orden mínima es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

6.18. IIR Chebyshev Tipo II

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

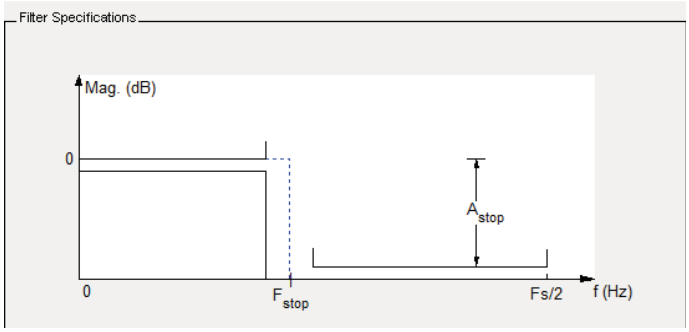


Figura 41. Filtro IIR Chebyshev tipo II

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

Si la orden mínima es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, o GHzis seleccionado
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

6.19. IIR Elliptic

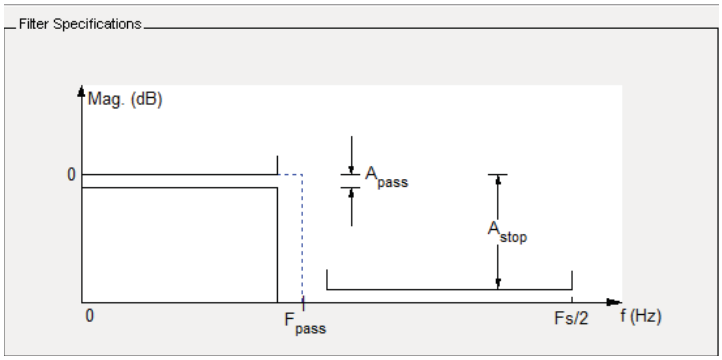


Figura 42. Filtro IIR Elliptic

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso

Si la orden mínima es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

6.20. IIR Maximally Flat

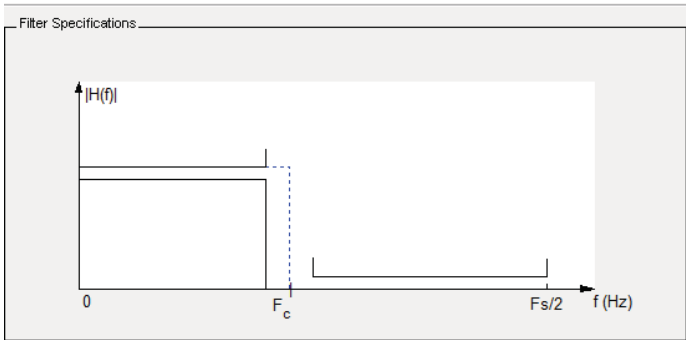


Figura 43. Filtro IIR Maximally Flat

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

Especifique las frecuencias de muestreo y corte:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- **Fc** (or **wc**) — frecuencia de corte, que es la frecuencia a la cual la respuesta de frecuencia es 3 dB por debajo de la ganancia del filtro pasabanda.

6.21. IIR Least Pth.

Normas de diseño

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que usted establezca las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz o.
- Fpass-End de la banda de paso.
- Fstop-A partir de la banda de detención

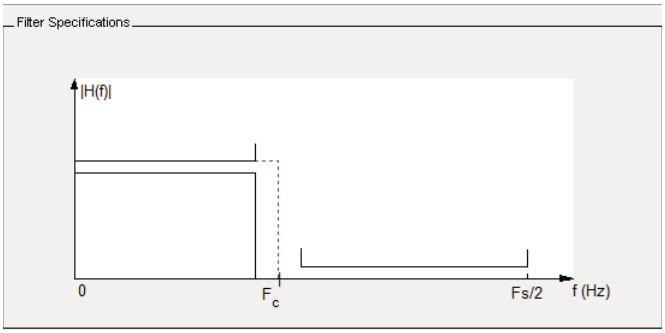


Figura 44. Filtro IIR Least Pth

Debido a que estos se aplican tanto a los filtros pasa bajo como pasa alto, las posiciones de los cambios de especificación se muestran en el área de análisis en FDATool.

Para los filtros de pasa banda y eliminador de banda, las especificaciones adicionales que se aplican:

- Fpass1- Primer borde de banda de paso.
- Fstop1- Primer borde de banda suprimida.
- Fstop2 borde de la segunda banda de rechazo.
- Fpass2 borde de la segunda banda de paso

Observe las posiciones relativas de los cambios de paso y bandas suprimidas entre supresión de banda y filtros de paso de banda. Esto se ve claramente en la máscara de diseño en el área de análisis en FDATool.

Consulte iirlpnorm para obtener más información acerca de estos filtros y especificaciones.

6.22. IIR Constrained Least Pth.

Normas de diseño

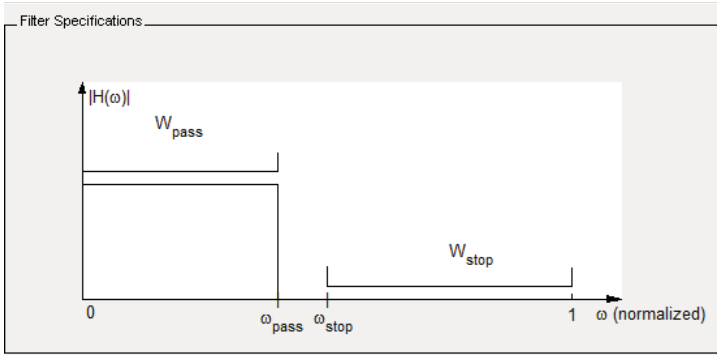


Figura 45. Filtro IIR Constrained Least Pth

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que usted establezca las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz o.
- Fpass-End de la banda de paso.
- Fstop-A partir de la banda de detención.

Debido a que estos se aplican tanto a los filtros pasa bajo como pasa alto, las posiciones de las especificaciones cambian como se muestra en el área de análisis en FDATool.

Para los filtros de paso de banda y eliminador de banda, las especificaciones adicionales que se aplican:

- Fpass1-Primer borde de banda de paso.
- Fstop1- Primer borde de banda suprimida.
- Fstop2 borde de la segunda banda de rechazo.
- Fpass2 borde de la segunda banda de paso.

Observe que las posiciones relativas de los cambios de paso y bandas suprimidas entre supresión de banda y filtros de paso de banda. Esto se ve claramente en la máscara de diseño en el área de análisis en FDATool.

Consulte iirlpnormc para obtener más información acerca de estos filtros y especificaciones.

6.23. FIR Equiripple

Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist

- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

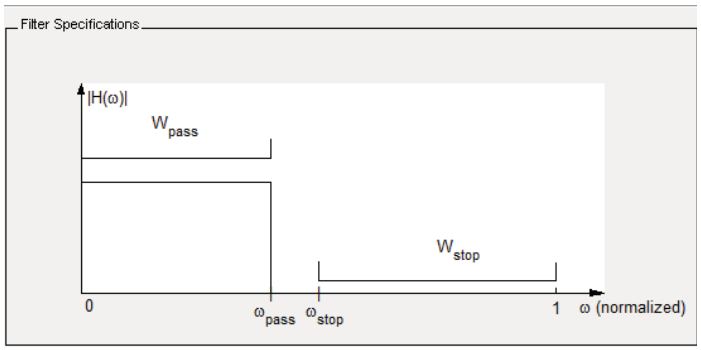


Figura 46. Filtro FIR Equiripple

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

6.24. FIR Least-Squares

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona

- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

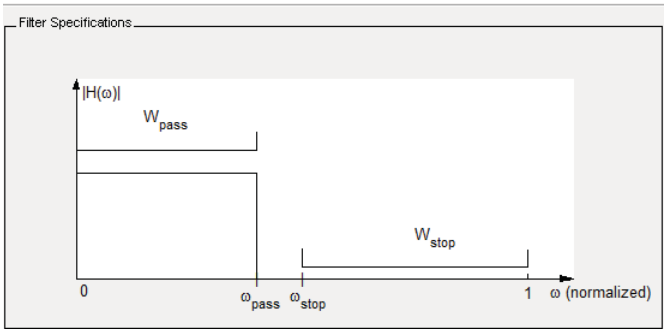


Figura 47. Filtro FIR Least-Squares

6.25. FIR Window

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

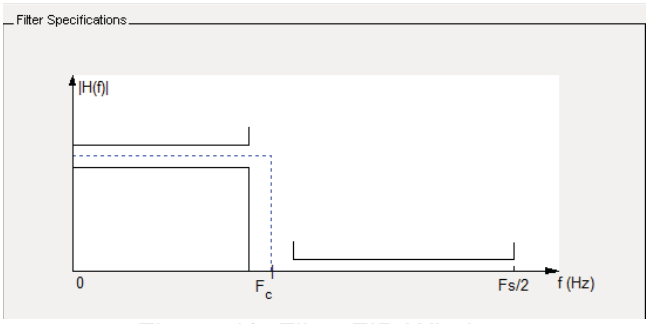


Figura 48. Filtro FIR Window

Si la orden se especifica es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fc (o wc) - frecuencia de corte, la frecuencia a la que la respuesta de magnitud es 6 dB por debajo de la ganancia de banda de paso

Si la orden mínima es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fpass (o wpass) - final de la banda de paso
- Fstop (o wstop) - comienzo de la banda de detención

6.26. FIR Constr. Least-Squares

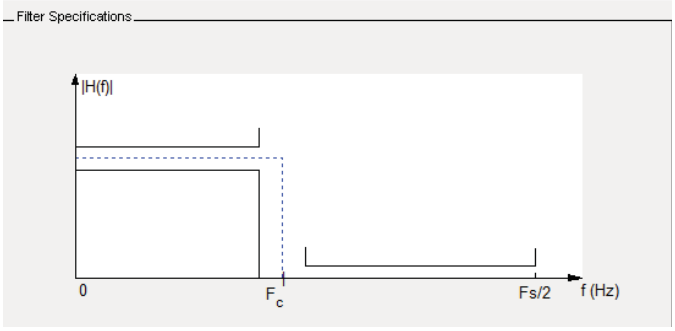


Figura 49. Filtro FIR Constr. Least-Squares

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

Especifique las frecuencias de muestreo y corte:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fc (o wc) - frecuencia de corte, la frecuencia a la que la respuesta de magnitud es 6 dB por debajo de la ganancia de banda de paso

6.27. FIR Complex Equiripple

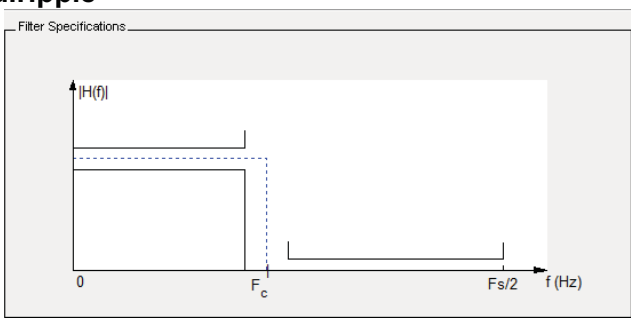


Figura 50. Filtro FIR Complex Equiripple

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

Especifique las frecuencias de muestreo y corte:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona
- Fstop1 (o Fstop2) - a partir de las bandas suprimidas
- Fpass1 (o Fpass2) - Fin de las bandas de paso

6.28. FIR Maximally Flat

Seleccione las unidades para las especificaciones de frecuencia de la lista de unidades:

- Normalizado (0 a 1), donde 1 corresponde a la frecuencia de Nyquist
- Hz (por defecto)
- kHz
- MHz
- GHz

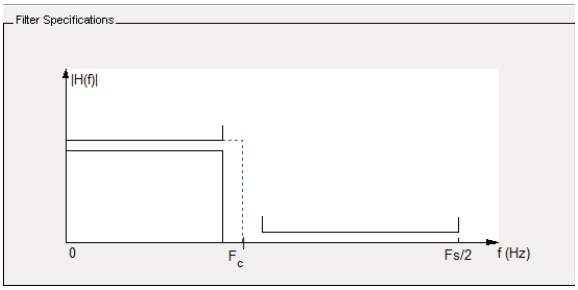


Figura 51. Filtro FIR Maximally Flat

Especifique las frecuencias de muestreo y corte:

- Fs (frecuencia de muestreo) - requerido cuando Hz, kHz, MHz, GHz o se selecciona

- Fc (o wc) - frecuencia de corte, la frecuencia a la que la respuesta de magnitud es 6 dB por debajo de la ganancia de banda de paso

6.29. Especificaciones de frecuencia para FIR Least Pth.
Normas de diseño

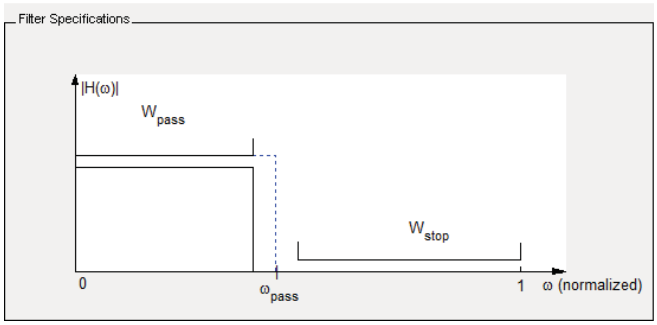


Figura 52. Filtro FIR Least Pth

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que ha establecido las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz o.
- Fpass-End de la banda de paso.
- Fstop (o Wstop)-A partir de la banda de detención.

Para obtener más información, consulte firlpnorm.

6.30. Especificaciones de frecuencia para el diseño del filtro FIR Constrained Equiripple

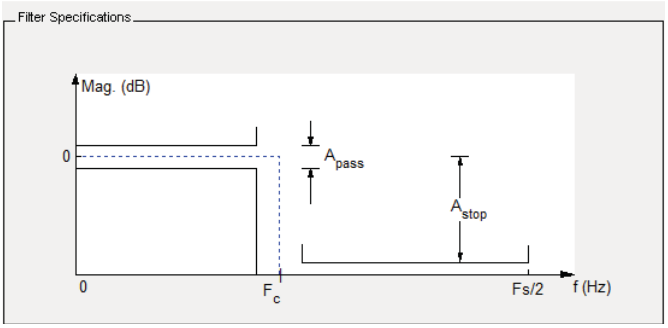


Figura 53. Filtro FIR Constrained Equiripple

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que usted establezca las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz o.
- Especificar: precisa cómo se definen las bandas de respuesta del filtro. Seleccione una de ellas.

1. Cutoff: ajusta la frecuencia de corte Fc filtro.
2. la banda de paso de borde Establece el final de la banda de paso del filtro Fpass.
3. banda de rechazo o de borde Define el borde del filtro Fstop banda de rechazo.

- Fc-Ajusta la frecuencia de corte para la banda de paso. En Fc, la respuesta del filtro es de 0,5 por diseño.
- Fpass: define el final de la banda de paso.
- Fstop: establece el principio de la banda de rechazo.

Consulte firceqrip para obtener más información acerca de estos filtros y especificaciones.

6.31. Especificaciones de frecuencia para el diseño del filtro Generalized Equiripple FIR

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que ha establecido las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

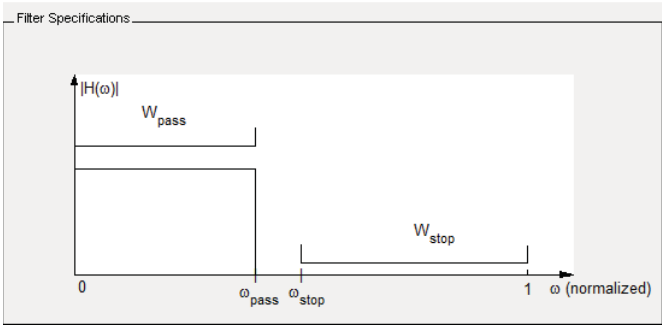


Figura 54. Filtro Generalized Equiripple FIR

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz o
- Fpass-End de la banda de paso.
- Fstop-A partir de la banda de detención.

Debido a que estos se aplican tanto a los filtros pasa bajo y pasa alto, las posiciones de las especificaciones cambian como se muestra en el área de análisis en FDATool.

Para los filtros de paso de banda y eliminador de banda, las especificaciones adicionales que se aplican:

- Fpass1-Primer borde de banda de paso.
- Fstop1- Primer borde de banda suprimida.
- Fstop2 borde de la segunda banda de rechazo.
- Fpass2 borde de la segunda banda de paso.

Observe que las posiciones relativas de los cambios de paso y bandas suprimidas entre supresión de banda y filtros de paso de banda. Esto se ve claramente en la máscara de diseño en el área de análisis en FDATool.

Consulte firgr para obtener más información acerca de estos filtros y especificaciones.

6.32. Especificaciones de frecuencia para el filtro Constrained Band Equiripple FIR

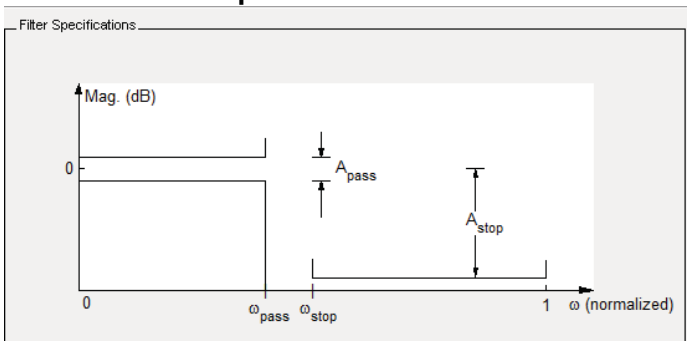


Figura 55. Filtro Constrained Band Equiripple FIR

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que usted establezca las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz.
- Fpass-End de la banda de paso.
- Fstop-A partir de la banda de detención.

Debido a que estos se aplican tanto a los filtros pasa bajo como pasa alto, las posiciones de las especificaciones cambian como se muestra en el área de análisis en FDATool.

Para los filtros de paso de banda y eliminador de banda, las especificaciones adicionales que se aplican:

- Fpass1-Primer borde de banda de paso.
- Fstop1-Primer borde de banda suprimida.
- Fstop2 borde de la segunda banda de rechazo.
- Fpass2 borde de la segunda banda de paso.

Observe que las posiciones relativas de los cambios de paso y bandas suprimidas entre supresión de banda y filtros de paso de banda. Esto se ve claramente en la máscara de diseño en el área de análisis en FDATool.

Consulte fircband para obtener más información acerca de estos filtros y especificaciones.

6.33. Especificaciones de frecuencia para el filtro Interpolated FIR

Seleccione las unidades a utilizar para especificar las especificaciones de frecuencia para el filtro de Unidades.

- Normalizado (0 a 1) significa que usted establezca las especificaciones de frecuencia con valores entre 0 y 1, donde 1 se ajusta a Fs / 2, la frecuencia de Nyquist.
- Hz, kHz, MHz, GHz le permite proporcionar las especificaciones de frecuencia en las frecuencias reales.

Especifique las siguientes frecuencias en los cuadros de texto, utilizando las unidades seleccionadas en Unidades:

- Fs (frecuencia de muestreo)-Se requiere cuando se selecciona Hz, kHz, MHz, GHz.
- Fpass-End de la banda de paso.
- Fstop-A partir de la banda de detención.

Debido a que estos se aplican tanto a los filtros pasa bajo como pasa alto, las posiciones de las especificaciones cambian como se muestra en la máscara de diseño en el área de análisis en FDATool.

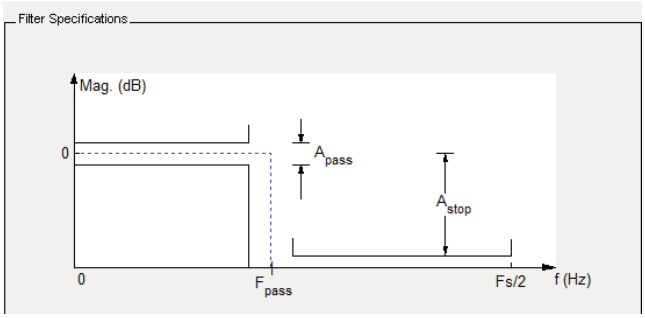


Figura 56. Filtro Interpolated FIR

Consulte IFIR para obtener más información acerca de estos filtros y especificaciones.

Especificaciones de magnitud

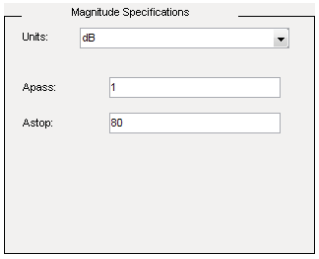


Figura 57. Especificaciones de magnitud del filtro Interpolated FIR

6.34. Especificaciones de la región de magnitud: Lowpass

IIR	FIR
Butterworth	Equiripple
Chebyshev Type I	Least-squares
Chebyshev Type II	Window
Elliptic	Constr. Least-Squares
Maximally flat	Complex Equiripple
	Maximally flat

6.35. IIR Butterworth

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, la atenuación a la frecuencia de corte se fija en 3 dB (la mitad de la banda de paso de energía).
Si la orden mínima es seleccionada en la región Orden de filtro, seleccione las unidades para magnitudes características de respuesta de la lista de unidades:

- dB para las características de respuesta de magnitud en decibeles (por defecto)
- Cuadrado para las características de respuesta de magnitud

Especificar las características de respuesta de magnitud en los cuadros de texto:

- APASS o ePass - ondulación banda de paso
- ASTOP o Estop - Atenuación banda de rechazo

6.36. IIR Chebyshev Type I

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique la onda de banda de paso (o APASS ePass) en decibeles.
Si la orden mínima es seleccionada en la región Orden de filtro, seleccione las unidades para magnitudes características de respuesta de la lista de unidades:

- dB para las características de respuesta de magnitud en decibeles (por defecto)
- Cuadrado para las características de respuesta de magnitud

Especificar las características siguientes magnitud de respuesta en los cuadros de texto:

- APASS o ePass - ondulación banda de paso
- ASTOP o Estop - Atenuación banda de rechazo

6.37. IIR Chebyshev Type II

Si se selecciona Especificar el orden en la región Filtro Orden, especifique la atenuación de banda de rechazo (o ASTOP Estop) en decibeles.
Si la orden mínima es seleccionada en la región Orden de filtro, seleccione las unidades para magnitudes características de respuesta de la lista de unidades:

- dB para las características de respuesta de magnitud en decibeles (por defecto)
- Cuadrado para las características de respuesta de magnitud

Especificar las características siguientes magnitud de respuesta en los cuadros de texto:

- APASS o ePass - ondulación banda de paso
- ASTOP o Estop - Atenuación banda de rechazo

6.38. IIR Elliptic

Seleccione las unidades para magnitudes características de respuesta de la lista de unidades:

- dB para las características de respuesta de magnitud en decibeles (por defecto)
- Cuadrado para las características de respuesta de magnitud

Especificar las características de respuesta de magnitud (en dB) en los cuadros de texto:

- APASS o ePass - ondulación banda de paso
- ASTOP o Estop - Atenuación banda de rechazo

6.39. IIR Maximally Flat

La magnitud en las frecuencias de corte se fija en la mitad de la energía de banda de paso (-3dB).

6.40. FIR Equiripple

Si la orden se especifica es seleccionada en la región Filtro Orden, especifique los siguientes pesos relativos en los cuadros de texto:

- Wpass - peso en la banda de paso
- Wstop - peso en la banda de rechazo

Si la orden mínima es seleccionada en la región Orden de filtro, seleccione las unidades para magnitudes características de respuesta de la lista de unidades:

- dB para las características de respuesta de magnitud en decibeles (por defecto)
- Lineal para características de respuesta lineal a escala de magnitud

Especificar las características siguientes magnitud de respuesta en los cuadros de texto:

- APASS o Dpass - ondulación banda de paso
- APASS o Dpass • ASTOP o DSTOP - Atenuación banda de rechazo

6.41. FIR Least-Squares

Especifique los pesos magnitud, como multiplicadores lineales, en los cuadros de texto:

- Wpass - peso en la banda de paso
- Wstop - peso en la banda de rechazo

6.42. FIR Window

Si la orden es seleccionada en la región Filtro Orden, la atenuación a la frecuencia de corte se fija en 6 dB (la mitad de la ganancia de banda de paso).

Para la opción de ventana de Kaiser, si Pedido mínimo se selecciona en la región Orden de filtro, seleccione las unidades para magnitudes características de respuesta de la lista de unidades:

- dB para las características de respuesta de magnitud en decibeles (por defecto)
- Lineal para características de respuesta lineal a escala de magnitud

Especificar las características siguientes magnitud de respuesta en los cuadros de texto:

- APASS o rizado Dpass banda de paso
- ASTOP o DSTOP - Atenuación banda de rechazo

6.43. FIR Constr. Least-Squares

Especificar las características de respuesta de magnitud en los cuadros de texto:

- Dpass - límites superior e inferior de la banda de paso.
- DSTOP - límites superior e inferior de la banda de detención

6.44. FIR Complex Equiripple

Especifique los siguientes pesos relativos en los cuadros de texto:

- Wstop1 y Wstop2 - pesos en las bandas suprimidas
- Wpass - peso en la banda de paso

6.45. FIR Maximally Flat
La magnitud en las frecuencias de corte se fija en la mitad de la ganancia de banda de paso (-3dB).

6.46.Transformar Vista general del modo filtro
Para transformar la vista del filtro, se utilizan los siguientes botones:

Figura 58. Botones para transformar la vista del filtro

El botón:
Cambia FDATool para filtrar modo de transformación. De este modo, convertir los filtros existentes en las formas de respuesta mediante el establecimiento de nuevas opciones en el panel Transformación del filtro.
Puede convertir filtros FIR e IIR que tienen pasa bajo, pasa alto, de supresión de banda, y los tipos de paso de banda de respuesta.
Las entradas en el cambio de lista de archivos Transformado tipo dependiendo de la forma de su filtro original. A partir de un filtro FIR, puede convertir a IIR. No se puede convertir a los filtros IIR filtros FIR.
Seleccione el tipo de respuesta para el filtro existente en la lista Tipo de filtro original y para el filtro de destino en la lista de tipos de transformada de filtro.
Para obtener más información acerca de la transformación de los filtros, consulte Transformaciones de frecuencia digital en la documentación de la Guía del usuario Filter Design Toolbox. Más información sobre el uso FDATool para transformar filtros reside aquí.

6.47 Transformación Filtrar general Pane
Como se muestra aquí, las opciones de transformación Filtro permiten transformar los filtros FIR y IIR de un formato a otro, como pasa bajo de pasa alto o pasa alto de supresión de banda. Realización de transformaciones de filtro le permite utilizar un filtro que tiene características de diseño que requieren para crear otro filtro con las mismas características en un formulario de respuesta diferente.

Botón editor Polo / Cero
Seleccione el Polo / Cero botón Editor de la barra lateral para editar el filtro, añadiendo, borrando o moviendo sus polos y ceros.

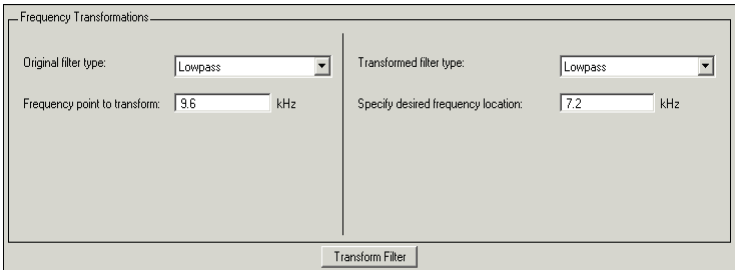


Figura 59. Panel para transformar el tipo de filtro

6.48. Importar Panel Filter

Seleccione el botón Importar, para importar los coeficientes del filtro y las variables del espacio de trabajo, o para introducir los coeficientes del filtro directamente.
En el filtro de Región Coeficientes seleccionar la representación de filtro deseado en el menú de estructura de filtro.

- Direct-form I
- Direct-form II
- Direct-form I transposed
- Direct-form II transposed
- Direct-form FIR
- Lattice all pass
- Lattice MA min. phase
- Lattice MA max. phase
- Lattice ARMA
- Discrete-time filter (DFILT object)
- Multirate filter (MFILT object); sólo se puede usar si Filter Design Toolbox está instalado.

La estructura que se elija determinará el tipo de coeficientes que es necesario especificar en los campos numerador y el denominador de la derecha. Hay que seguir los enlaces de arriba para obtener más información sobre la especificación de los coeficientes.
Sección de segundo orden. Para importar una forma directa-I o II, secciones de filtro de segundo orden, seleccione la Importación como de segundo orden secciones casilla de verificación. Especifica la Ganancia y SOS parámetros Matrix utilizando cualquier variable válido MATLAB o expresión.

6.49. Frecuencia de muestreo

Seleccione las unidades de frecuencia de muestreo de entre las siguientes opciones en el menú de unidades:

- Normalized (0 a 1) (default)
- Hz
- kHz
- MHz
- GHz

Para Hz, kHz, MHz, GHz o especificar el valor de la frecuencia de muestreo en el campo Fs.
Direct - form. Especifique el numerador y el denominador coeficientes polinomiales utilizando cualquier variable válido MATLAB o expresión. Ver para más información. (Para FIR forma directa, sólo se especifica el numerador. El denominador para filtros FIR es siempre 1.) Haga clic en Borrar para borrar los coeficientes.
Lattice: Especifique el coeficiente Lattice y los coeficientes de escalera coeff usar cualquier variable válido MATLAB o expresión. Ver para más información. Haga clic en Borrar para borrar los coeficientes.
Tiempo discreto del filtro (Object DFILT): Especifique un objeto dfilt y la frecuencia de muestreo. Haga clic en Borrar para borrar los datos
Multirate Filter (Object MFILT): Si tiene Filter Design Toolbox, especifique un objeto mfilt y la frecuencia de muestreo. Haga clic en Borrar para borrar los datos.
Importar botón Filtro. Seleccione este botón para importar los coeficientes de filtro especificados.

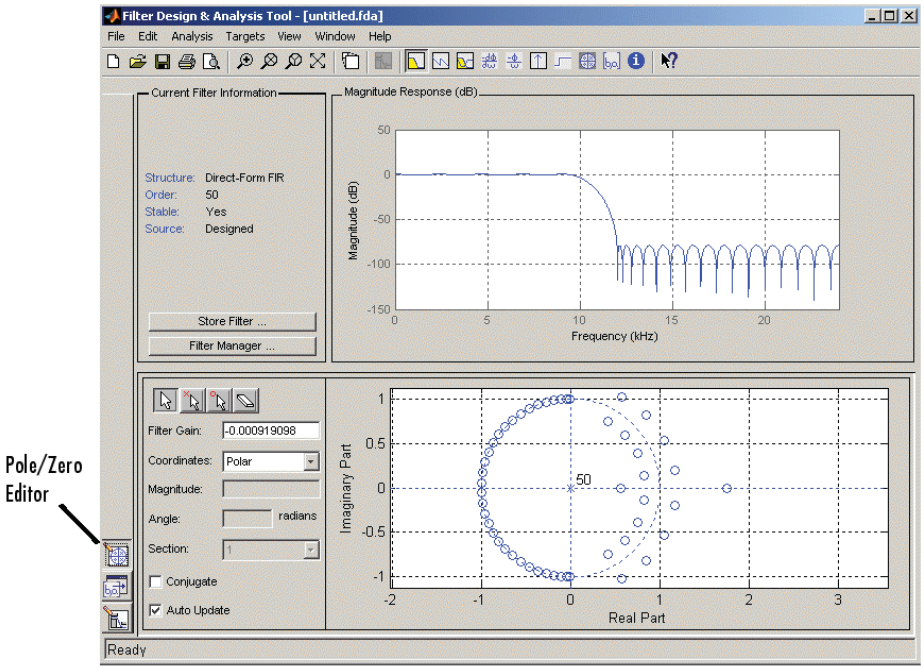


Figura 60. Polo/ Cero

6.50. Panel de diseño de filtros

Haga clic en el botón Diseño de Filtros barra lateral para diseñar un filtro mediante la especificación de los requisitos del filtro.

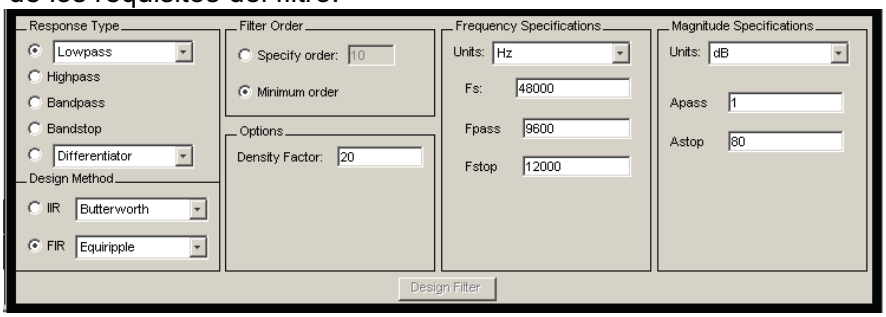


Figura 61. Panel de diseño de filtro

El panel de diseño de filtro tiene las siguientes regiones:

- Response Type Region
- Design Method Region
- Filter Order Region
- Options Region
- Frequency Specifications Region
- Magnitude Specifications Region

7. Uso del LabView para el filtrado

En la paleta Function, buscar All Functions entrar a Analyze, posteriormente a Waveform conditioning. Entre las posibilidades está el icono Filter, Digital IIR Filter y Digital FIR Filter. A continuación describiremos cada uno:

7.1. Filter.vi

La figura siguiente nos muestra, los contenidos del vi Filter

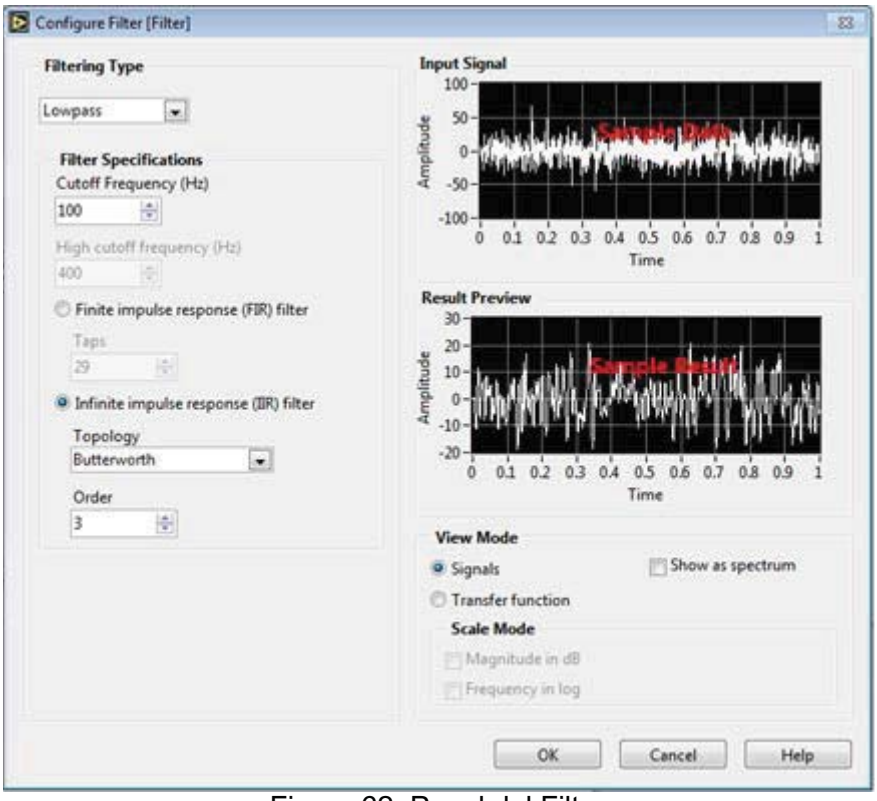


Figura 62. Panel del Filter

En la parte de Filter design, se puede seleccionar el tipo de filtro, tal como se observa en la siguiente figura:

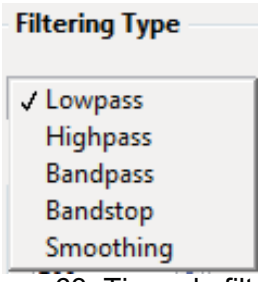


Figura 63. Tipos de filtros

Debajo se observa que se pueden seleccionar las frecuencias de corte y también si el filtro a diseñar es FIR ó IIR. Debajo la topología y el orden del filtro.

Para los FIR no hay topología, solamente viene un filtro por defecto y para los IIR se observan las siguientes posibilidades de diseño del filtro:

Figura 64. Diferentes topologías de filtros IIR

A la derecha del panel se muestra la señal de entrada y la señal de salida del filtro.

Debajo de los dos osciloscopios hay botones que dan la posibilidad de ver las señales o la función de transferencia en los osciloscopios, o también verlas como espectro.

Se puede seleccionar el tipo de escala en Scale Mode.

7.2. Digital FIR FIlter.vi

Con el Digital FIR FIlter, se pueden diseñar filtros FIR, tal y como aparece en la siguiente figura:

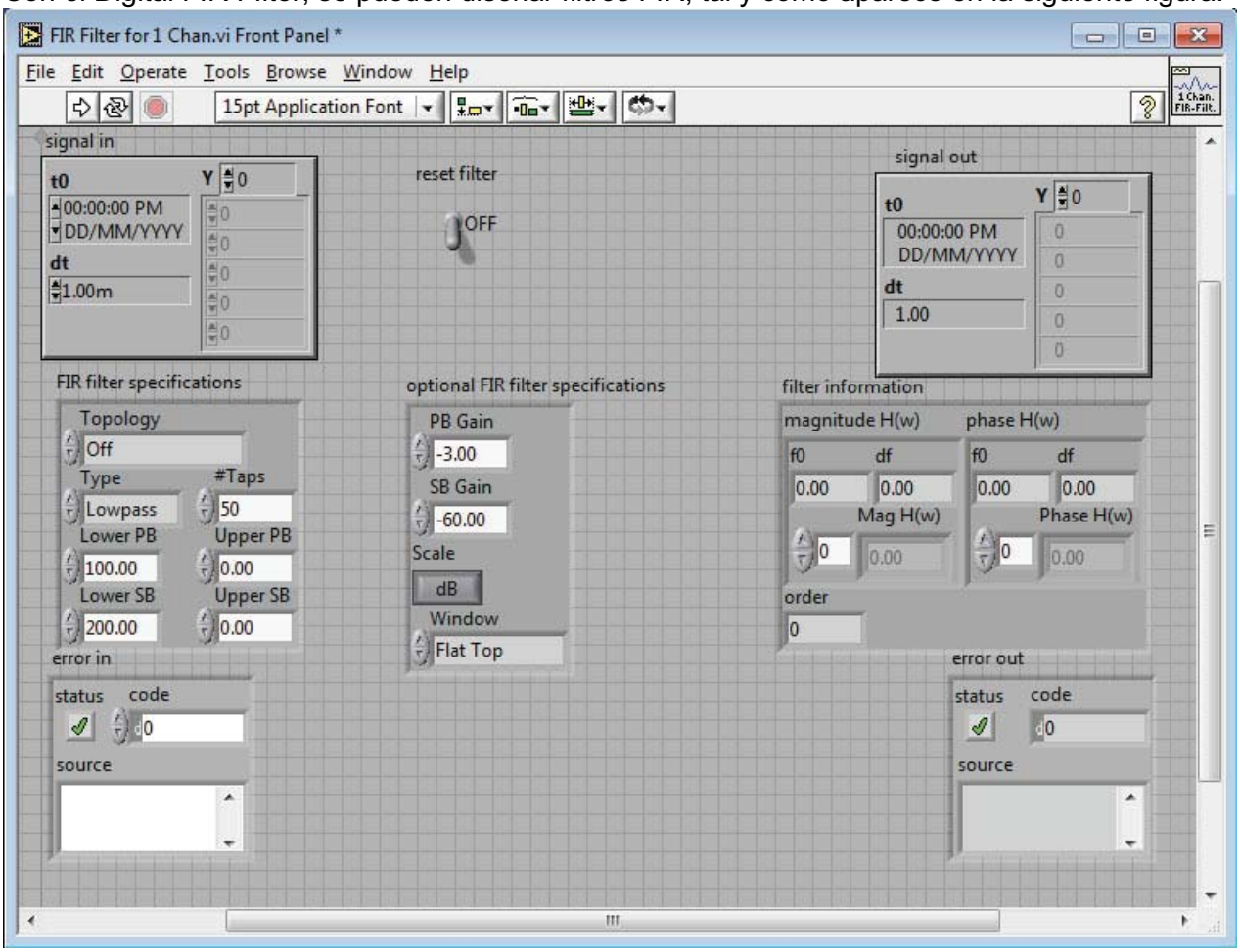


Figura 65. Panel del Digital FIR FIlter

En la pestaña Topology, se pueden conseguir filtros FIR by, Equirriple FIR, Windowed FIR, o desconectarlo.

En cuanto al tipo se seleccionan los 4 básicos: pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda y rechazo de banda.

Todos los demás botones y comandos son para la selección de los valores numéricos de ajuste del filtro o para visualizar las características y resultados.

7.3. Digital IIR FIlter.vi

Las topologías posibles son: Bessel, Elliptic, Inverse Chebyshev, Chebyshev y Butterworth.

En cuanto al tipo se seleccionan los 4 básicos: pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda y rechazo de banda.

Los demás botones y comandos que aparecen en el tapiz, son para la selección de los valores numéricos de ajuste del filtro seleccionado. Hay una otra zona para visualizar las características de ajuste y resultados de las salidas y entradas al filtro.

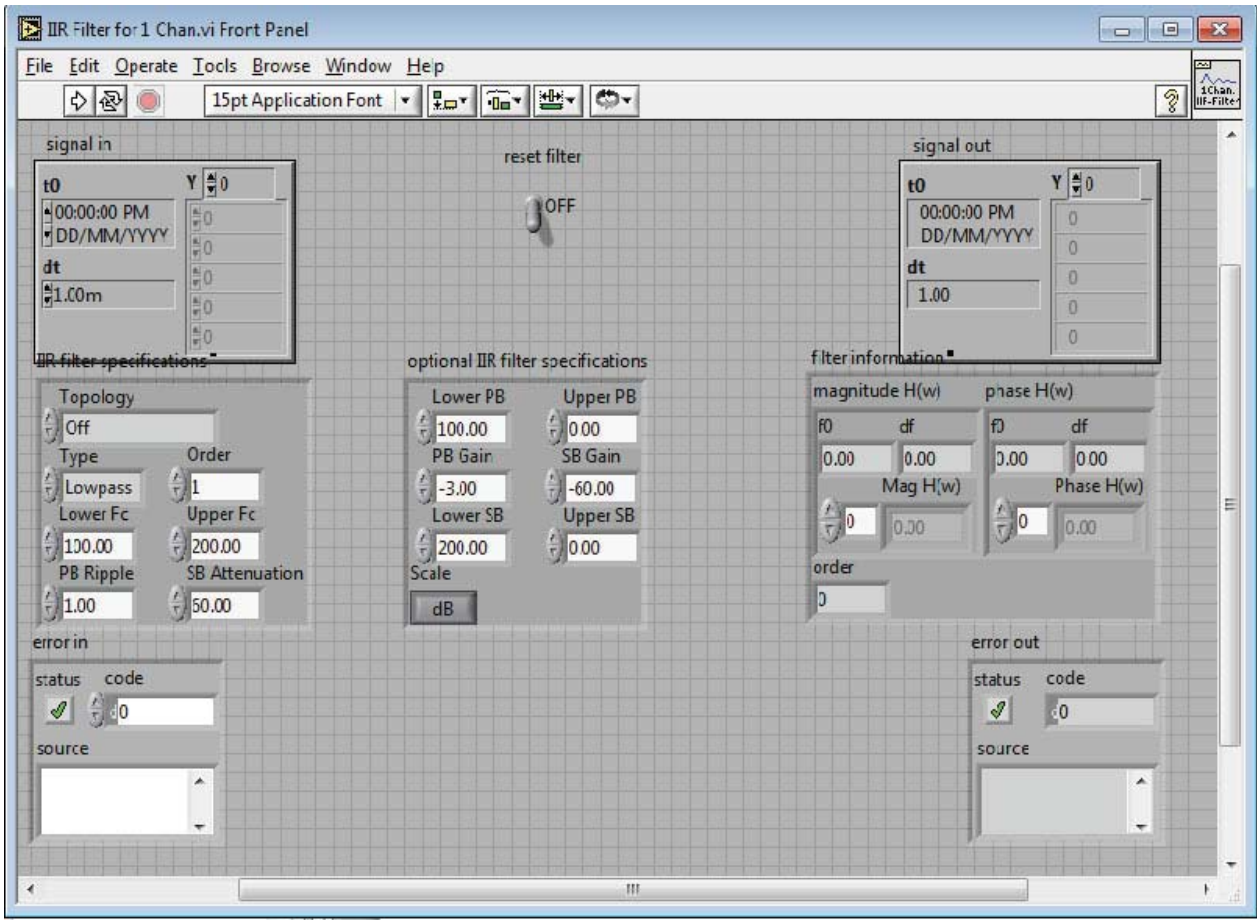


Figura 66. Panel del Digital IIR Filter

Bibliografía

[1] **A.V Oppenheim, R. W Schafer y J. R Buck.** *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto.* s.l. : Prentice Hall, Segunda edición, 2000.

[2] **Bellanger, Maurice G.** *Adaptive Digital Filters.* New York : MARCEL DEKKER, INC., Second Edition, Revised and Expanded, 2001. 0-8247-0563-7.

[3] **Smith, Steven W.** *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.* San Diego, California : California Technical Publishing, Second Edition, 1999. 0-9660176-6-8.

[4] **Proakis, V. Ingle & J.** *Digital Signal Processing using Matlab.* Londres : PWS Publishing Company , 2009.

[5] **Barchiesi, Juan Vignolo.** *Introducción al Procesamiento Digital de Señales.* Valparaíso, Chile : Ediciones Universitarias de Valparaíso, 2008. 978-956-17-0426-8.

[6] **Rorabaugh, C Britton.** *Digital Filter Designer´s Handbook. Featuring C rutines.* Filadelfia : TAB Books, Divition of McGarw Hill, Inc, 2008.

[7] **Gérard Blanchet, Maurice Charbit.** *Digital signal and image processing using Matlab.* Lndres : British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2006. 978-1-905209-13-2.

[8] **Larman, Craig.** UML y Patrones. Introducción al análisis y diseño orientado a objetos. La Habana : Editorial Félix Varela, 2004.

[9] **George A. Constantinides, Peter Y. K. Cheung, Wayne Luk.** *Synthesis and Optimization of DSP Algorithms.* New York : Kluwer Academic Publishers, 2004. 1-4020-7931-1.

[10] **Nava, Alejandro.** *Procesamiento de series de tiempo .* Mexico : Fondo Cultura Económica, 2002.

[11] **Lindner, Douglas K.** *Introducción a las Señales y los Sistemas.* s.l. : McGraw-Hill, 2002 . 980-373-049-5.

[12] **Deitel, H. M.** Java. How to Program. New York : Prentice Hall, 2002.

[13] **Sen M Kuo, Bob H Lee.** *Real timing Digital signal processing. Implementations, applications and experimentes with the TMS320C55X.* New York : John Wiley & Sons, LTD, 2001. 0-470-84137-0.

[14] **John Proakis, Dimitris Manolakis.** *Tratamiento digital de señales.* Madrid : Prentice Hall, 1998 .

[15] **Alan Oppenheim, Alan Willsky.** *Señales y Sistemas.* México : Prentice Hall, 1998.