



Monografía

INTRODUCCIÓN A LOS FILTROS ACTIVOS

Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

Septiembre de 2026

Tipo de Proyecto: desarrollo tecnológico

Financiamiento interno

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología

Ciudad de México, 2026



Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visite:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

O envíe una carta a:

Creative Commons

PO Box 1866

Mountain View, CA 94042, USA.

Título: Introducción a los filtros activos

Autor: Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología. Grupo de Desarrollo de Sistemas Electrónicos. Departamento de Instrumentación y Medición.

Resumen

En esta monografía se abordan los conceptos básicos de los filtros activos, incluyendo sus características de respuesta en frecuencia, las diferentes aproximaciones (Butterworth, Bessel y Chebyshev) y algunas topologías prácticas; por ejemplo: Sallen-Key y variables de estado. A diferencia de otros textos, el material fue elaborado para ajustarse al temario de la asignatura Circuitos Integrados Analógicos que se imparte en la carrera de Ingeniería Eléctrica-Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El documento incluye oscilogramas de implementaciones prácticas y simulaciones por computadora mediante SPICE y MATLAB, con la finalidad de que el lector se familiarice con dichas herramientas. En el anexo se incluye el código en MATLAB para generar las gráficas presentadas.

Índice

Resumen	2
1 Introducción	5
1.1 El problema del filtrado y la necesidad de filtrar señales	5
1.2 ¿Qué es un filtro eléctrico?	6
1.3 Filtros pasivos y activos	7
1.4 Clasificación por su banda de paso (selectividad)	7
1.5 ¿Qué es entonces la respuesta en frecuencia?	9
2 Filtros activos de primer orden	9
3 Regiones en la respuesta en frecuencia	10
4 Aproximaciones: Butterworth, Chebyshev y Bessel	11
5 Topologías bicuadráticas	17
Ejemplo 1	20
Ejemplo 2	22
6 Filtros en cascada	27
7 Filtros de variables de estado	27
8 Diseño de filtros activos	30
8.1 Ejemplo de diseño	30
REFERENCIAS	33
ANEXOS	34
Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 8	34
Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 10	35
Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 11	36

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 12 37

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 13 38

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 14 40

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 24 41

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 25 42

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 30 43

Lista de partes del circuito de la figura 20 44

Diagrama esquemático del circuito de la figura 20 44

Plano del circuito impreso del filtro de la figura 20 45

1 Introducción

El tema de filtros activos es recurrente en diversas asignaturas del área de ingeniería electrónica. En particular, forma parte del temario de la asignatura Circuitos Integrados Analógicos que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en el octavo semestre de la carrera de Ingeniería Eléctrica-Electrónica. También forma parte del temario de la asignatura Amplificación y Filtrado de Señales Biomédicas, que se imparte en la Ingeniería en Sistemas Biomédicos de la misma facultad. El objetivo de la presente monografía es proporcionar a los estudiantes una introducción a los conceptos, al análisis y al diseño de filtros activos, con base en el temario de la asignatura Circuitos Integrados Analógicos, en un formato apoyado por gráficas generadas mediante la simulación por computadora de circuitos electrónicos utilizando LTSpice. Las simulaciones realizadas con LTSpice consideran el uso de componentes pasivos ideales y aproximaciones reales del funcionamiento de los amplificadores operacionales. Se presentan casos de simulación matemática con MATLAB (R2024b), que requiere la instalación del Control System Toolbox. También se incluyen algunos oscilogramas de circuitos reales. En los temarios citados se contempla el uso de herramientas de simulación, sin embargo, son pocos los casos en la literatura que las incluyen. LTSpice es de distribución gratuita y la UNAM cuenta con licencia para el uso de MATLAB por parte de académicos y estudiantes. En los anexos se incluyen los listados de los programas en MATLAB. También se han añadido la lista de partes, el diagrama esquemático y los planos de la tarjeta PCB que se muestran en la sección 5.

1.1 El problema del filtrado y la necesidad de filtrar señales

Al estar en un restaurante, o en una fiesta muy concurrida, puede resultar difícil entender lo que dice nuestro interlocutor. Es decir, tratar de separar sus palabras del resto de las conversaciones y del ruido de fondo. El problema de discriminar una señal del resto de las señales en el ambiente y del ruido de fondo es un problema común en el campo de la electrónica. Tomemos por ejemplo el caso de una señal electrocardiográfica. En la figura 1 se muestra un diagrama a bloques donde se muestra la conexión de tres electrodos a un paciente. La señal producida por el corazón se detecta al nivel de la piel y tiene una

amplitud entre $50\text{ }\mu\text{V}$ y 5 mV (Martinek, 2021), pero queda enmascarada por el ruido que también detectan los electrodos. Este ruido puede incluir: señales de radiofrecuencia, señales mioeléctricas, interferencia de la línea eléctrica y polarización de los electrodos. Para reducir los efectos del ruido se utilizan circuitos de filtrado, que permiten hacer la separación de la señal cardíaca del resto de las señales y ruido detectados.

Un ejemplo de la utilidad de un filtro se presenta en la figura 2. Del lado izquierdo se muestra una señal senoidal embebida en ruido. Al centro se tiene el diagrama esquemático de un filtro RC, el cual recibe como entrada la señal con ruido. Finalmente, en el lado derecho se observa la señal a la salida del filtro, con una reducción notoria del nivel de ruido.

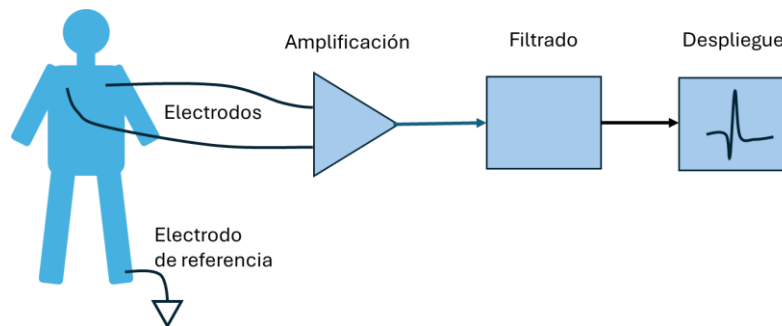


Figura 1. Esquema simplificado del registro de una señal electrocardiográfica (elaboración propia).

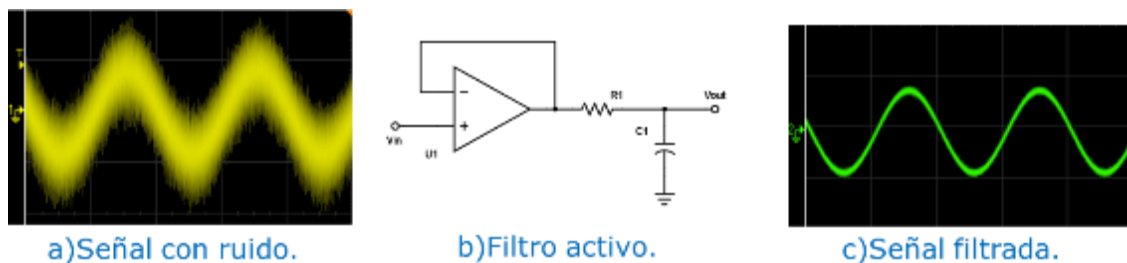


Figura 2. Ejemplo de la utilidad de un filtro electrónico (elaboración propia).

1.2 ¿Qué es un filtro eléctrico?

Un filtro eléctrico es un circuito que procesa una señal eléctrica con fines de separación o discriminación. Las señales eléctricas pueden llevar información codificada en su

amplitud, frecuencia o fase; sin embargo, en la literatura comúnmente se considera la siguiente definición (Stanley, 1990)

Un filtro eléctrico es un circuito que procesa una señal en función de la frecuencia.

Usualmente se busca que la variable que cambia en función de la frecuencia sea la amplitud, aunque también se verá modificada la fase. Separar las frecuencias de la señal que son de interés y atenuar el resto de las frecuencias se le denomina limitar el ancho de banda, y tiene como resultado una reducción del nivel de ruido.

1.3 Filtros pasivos y activos

Los filtros se pueden clasificar de diferentes maneras, una de ellas es en función del tipo de componentes. Se denomina filtros pasivos a los formados exclusivamente por componentes pasivos tales como: resistencias, capacitores e inductores. Los filtros activos están contruidos por componentes pasivos (resistencias y capacitores) y al menos un componente activo, como un amplificador. En este sentido, se entiende por componente activo aquel que requiere una fuente de energía externa para funcionar.

Los filtros pasivos, también denominados filtros RLC, presentan inconvenientes al aplicarse en las frecuencias bajas del intervalo del audio. A medida que la frecuencia de operación disminuye, requieren de valores de inductancia más elevados. Estos inductores incrementan su volumen, su peso, y sus pérdidas por la resistencia del devanado. Estos problemas se resuelven mediante el uso de los filtros activos.

1.4 Clasificación por su banda de paso (selectividad)

Los filtros también se pueden clasificar por el intervalo de frecuencias que seleccionan (amplifican). A esto se le llama banda de paso. El intervalo de frecuencias que se desea atenuar se denomina banda de supresión. En el caso ideal, un filtro amplificará las señales de un cierto intervalo de frecuencias y atenuará completamente las restantes. Es así como se puede tener filtros: paso-bajas, paso-altas, paso-banda y supresores de banda, como se puede ver en la figura 3. Un filtro paso-bajas amplificará las señales con frecuencias menores a un valor denominado frecuencia de corte (f_c) y eliminará las

restantes. Un filtro paso-altas amplificará las señales superiores a una frecuencia de corte. Los filtros paso-banda y supresor de banda amplificarán las frecuencias dentro, o fuera de un intervalo definido por el par de valores f_{c1} y f_{c2} , respectivamente. También existe la respuesta paso-todo, donde lo que se modifica es la fase de la señal.

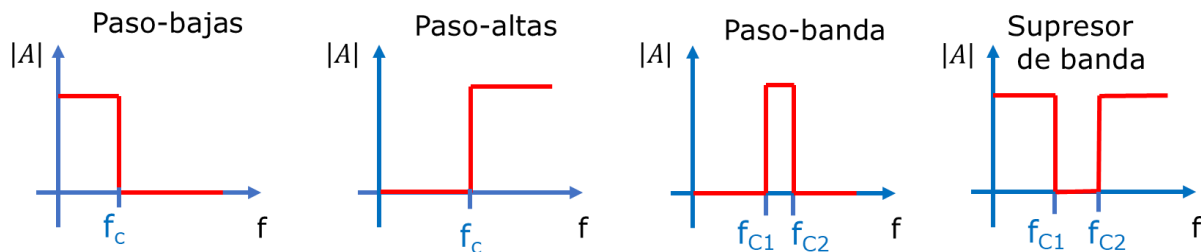


Figura 3. Banda de paso de los filtros ideales (elaboración propia).

Las gráficas de la respuesta de los filtros ideales tienen fines explicativos, dado que no es posible implementarlas de manera práctica. Entonces la respuesta en frecuencia se **aproximará** a la ideal. En la figura 4 se puede ver una representación de la respuesta no-ideal de los filtros.

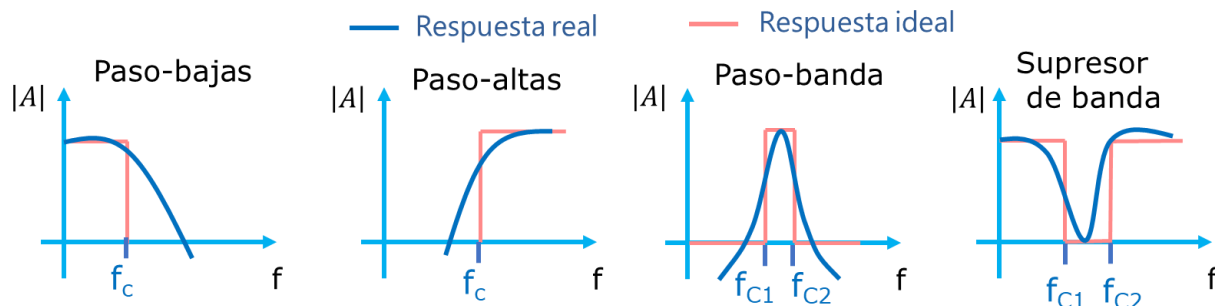


Figura 4. Representación de la respuesta no-ideal (línea azul oscuro) de algunos filtros (elaboración propia).

Comúnmente se define el valor de la frecuencia de corte f_c como aquel valor para el cual la ganancia es 3 dB menor que la obtenida en la banda de paso (ver figura 5). Este valor representa la frecuencia a la cual la potencia de la señal ha decaído al 50 % de su nivel inicial.

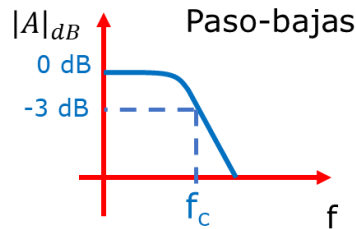


Figura 5. La frecuencia de corte (f_c) a -3 dB en un filtro paso-bajas (elaboración propia).

1.5 ¿Qué es entonces la respuesta en frecuencia?

Para responder esa pregunta consideremos la respuesta de un amplificador electrónico mostrada en la figura 6. La gráfica del osciloscopio muestra dos casos de una señal de entrada senoidal: a) 1 kHz, b) 2 kHz. Se puede observar que la amplitud de la señal de salida disminuye cuando la entrada es de 2 kHz. Entonces se dice que la respuesta (en amplitud) depende de la frecuencia.



Figura 6. Ejemplo de la respuesta en frecuencia de un amplificador vista en un osciloscopio (elaboración propia).

2 Filtros activos de primer orden

Los ejemplos más sencillos de filtros activos son los de primer orden, y se muestran en la figura 7 las configuraciones paso-bajas y paso-altas. Están constituidos por un filtro RC y un amplificador seguidor de voltaje, el cual sirve para desacoplar impedancias con las etapas subsecuentes del procesamiento de la señal. La frecuencia de corte se calcula en ambos casos como

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} [Hz] \quad (1)$$

Para el caso de $f_c = 1 \text{ kHz}$, la simulación en MATLAB de su respuesta en frecuencia se muestra en la figura 8. Se observa que su frecuencia de corte coincide con una atenuación de 3 dB.

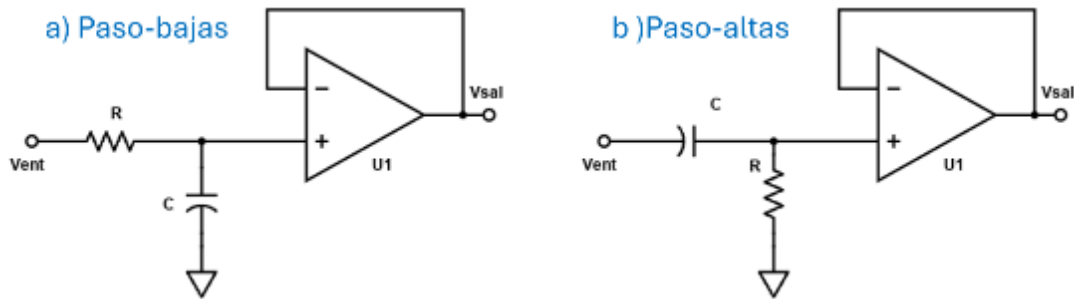


Figura 7. Filtros activos de primer orden (elaboración propia).

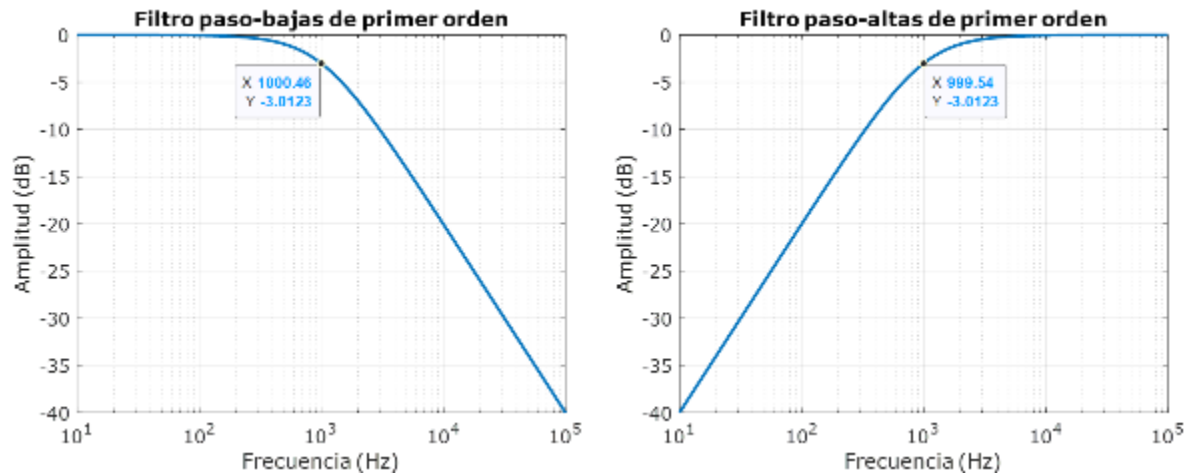


Figura 8. Respuesta en frecuencia de filtros de primer orden (elaboración propia).

Es posible colocar primero al seguidor de voltaje y después el filtro RC, como aparece en la figura 2b, lo cual dependerá de la aplicación.

3 Regiones en la respuesta en frecuencia

La respuesta de los filtros se puede dividir en tres regiones: ganancia constante, transición y atenuación constante. La frecuencia de corte divide dos zonas denominadas:

banda de paso y banda de atenuación. En la figura 9 se ilustran estas zonas y regiones para el caso de un filtro paso-bajas. Para el caso de un filtro de primer orden, la región de atenuación constante se aproxima asintóticamente a una pendiente de -20 dB/DEC. Un filtro de segundo orden lo hará a una pendiente de -40 dB/DEC y así sucesivamente.

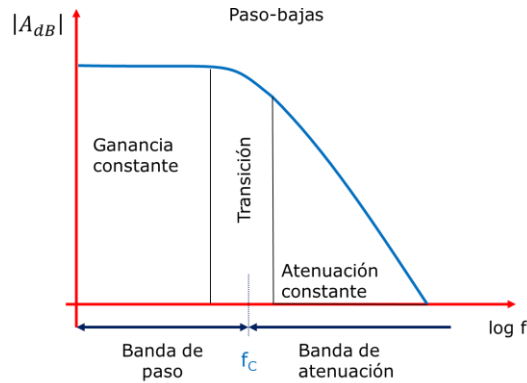


Figura 9. Regiones de la respuesta en frecuencia de un filtro paso-bajas (elaboración propia).

4 Aproximaciones: Butterworth, Chebyshev y Bessel

El diseño de filtros se suele dividir en dos fases: aproximación y realización. La aproximación consiste en determinar una función matemática que satisfaga los requerimientos de banda de paso, más banda de atenuación y, al mismo tiempo, pueda ser implementada por un circuito práctico (realización). El estudio de los filtros eléctricos pasivos y activos constituidos a partir de componentes lineales se basa en la teoría de sistemas lineales. De esta manera, los filtros se estudian como un sistema cuya función de transferencia queda definida por la expresión (2).

$$H(s) = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (2)$$

Donde s es una variable compleja, tal que: $s = \sigma + j\omega$. n indica el orden del filtro. Si se factoriza la ecuación (2) se puede obtener

$$H(s) = \frac{(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_n)} \quad (3)$$

Donde $z_1\dots z_m$ son los ceros y $p_1\dots p_n$ son los polos del sistema.

Muchos de los filtros eléctricos pueden describirse mediante una función de transferencia de potencia, que en el caso del filtro paso-bajas se puede escribir como:

$$H(s)H^*(s) = \frac{1}{1+\varepsilon^2 P_n^2(s)} \quad (4)$$

Donde P_n es una aproximación polinomial a la respuesta deseada del filtro y ε es el factor de rizo. Entre las aproximaciones polinomiales más utilizadas se encuentran: Butterworth, Bessel y Chebyshev. Los coeficientes de esos polinomios se pueden encontrar en tablas que aparecen en la literatura, por ejemplo, en (Pactitis, 2007). A partir del caso paso-bajas de la expresión (4), se pueden construir funciones de transferencia para los otros tipos de respuesta.

Cada una de las gráficas de respuesta en frecuencia de la figura 3 será aproximada mediante una función de transferencia con una estructura particular. Por ejemplo, para el caso de un filtro paso bajas de segundo orden su función de transferencia generalizada puede escribirse como

$$H(s) = \frac{a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

En donde ω_n es la frecuencia natural del filtro, Q es el factor de calidad y ξ el factor de amortiguamiento. De la frecuencia natural depende la frecuencia de corte del filtro. El factor de calidad afecta la forma de la respuesta en frecuencia, según se muestra en la figura 10, para el caso cuando $\omega_n = 1$ [rad/s]. De esta manera, Q influye en la manera en

que se aproxima la respuesta al caso ideal. Valores bajos de Q producen una respuesta suavizada con atenuación antes de la frecuencia de corte. Por otro lado, al incrementar Q la respuesta presenta resonancia.

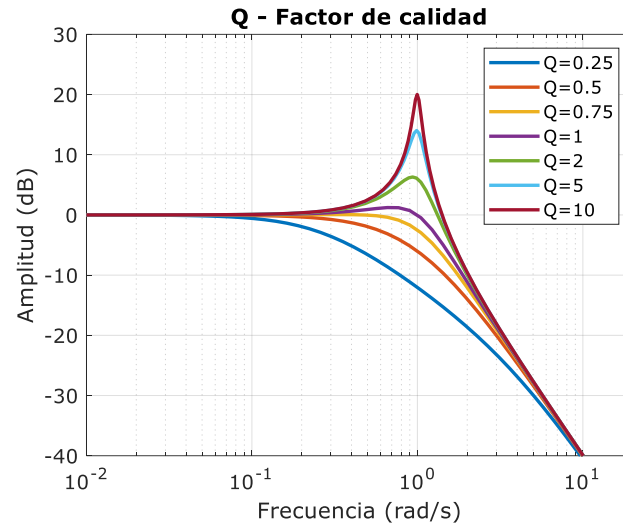


Figura 10. Influencia del factor de calidad en la respuesta de un filtro de segundo orden (elaboración propia).

Para definir los coeficientes a_0, b_1, b_0 de la función de transferencia se emplea lo que se denomina ‘aproximación’. Esto se refiere al método mediante el cual la función de transferencia intentará aproximarse a la respuesta ideal. En la expresión (3), a_0 es un factor de ganancia. Los coeficientes b_1, b_0 se determinan de acuerdo con familias de polinomios. Por ejemplo, si se desea una frecuencia de corte $\omega_c=1$ [rad/s], los coeficientes quedarían definidos según la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes para un filtro paso-bajas (elaboración propia).

Aproximación	b_1	b_0
Butterworth	1.4142	1
Bessel	1.7321	1
Chebyshev_1dB	1.0977	1.1025

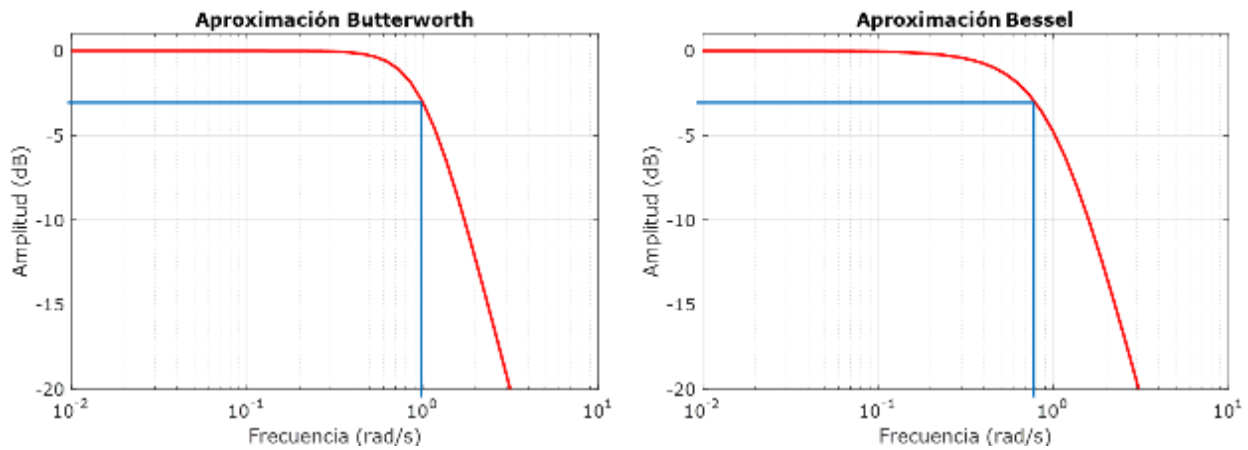


Figura 11. Frecuencia de corte para las aproximaciones Butterworth y Bessel (elaboración propia).

En la figura 11 se muestra la simulación en MATLAB de la respuesta en frecuencia para un filtro paso-bajas de segundo orden, de acuerdo con los datos de la tabla 1. Se observa que la frecuencia de corte $\omega_c=1$ [rad/s], ocurre aproximadamente a los -3 dB, en el caso de la aproximación Butterworth, pero no es así para la aproximación Bessel. También se puede ver que la amplitud de la ganancia del Bessel comienza a disminuir a frecuencias menores que en el caso Butterworth.

A medida que se incrementa el orden del filtro, la respuesta en frecuencia observará una caída más abrupta a partir de la frecuencia de corte, como se puede apreciar en la figura 12, para la aproximación Butterworth. En la figura 13 se presentan las gráficas de la respuesta para las aproximaciones Chebyshev y Bessel. El filtro Chebyshev presenta rizo en la banda de paso, lo cual puede ser un inconveniente, pero a cambio de esto se obtiene una caída más rápida de la ganancia en la banda de atenuación. El nivel de rizo del filtro Chebyshev se puede modificar haciendo cambios a los coeficientes de la función de transferencia. En este caso, se hizo el cálculo para un nivel de rizo en la banda de paso de 3 dB.

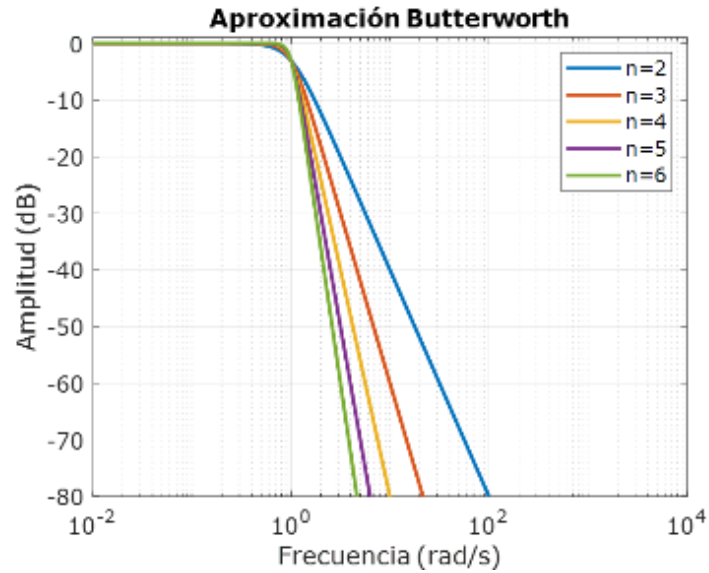


Figura 12. Respuesta paso-bajas de la aproximación Butterworth de orden 2 al 6 (elaboración propia).

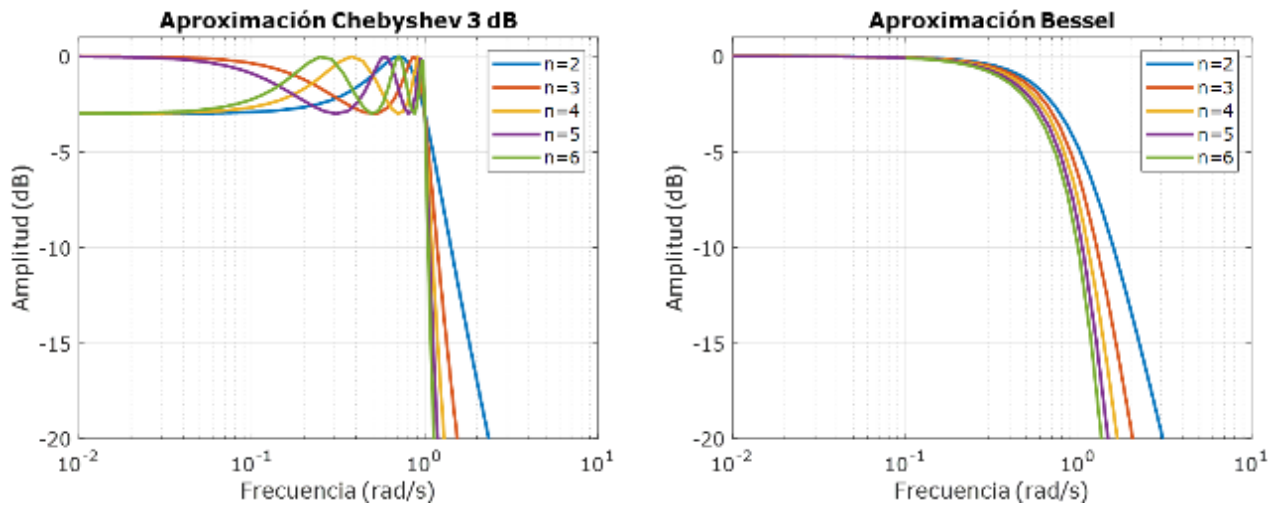


Figura 13. Respuesta paso-bajas para las aproximaciones Chebyshev (-3dB) y Bessel (elaboración propia).

Las diferentes curvas de respuesta en frecuencia para las aproximaciones Butterworth, Bessel y Chebyshev de segundo orden se muestran en la figura 14. Ahí se pueden observar las diferencias principales, que se enlistan en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación de las aproximaciones (elaboración propia).

Aproximación	Características
Butterworth	Ganancia constante en la banda de paso. Frecuencia de corte en -3 dB
Chebyshev	Rizo en la banda de paso. Mayor atenuación en la banda de supresión. Frecuencia de corte no es en -3 dB
Bessel	Ligera pendiente de atenuación en la banda de paso. Frecuencia de corte en -3 dB Respuesta de fase lineal. Menor distorsión de la respuesta en el tiempo.

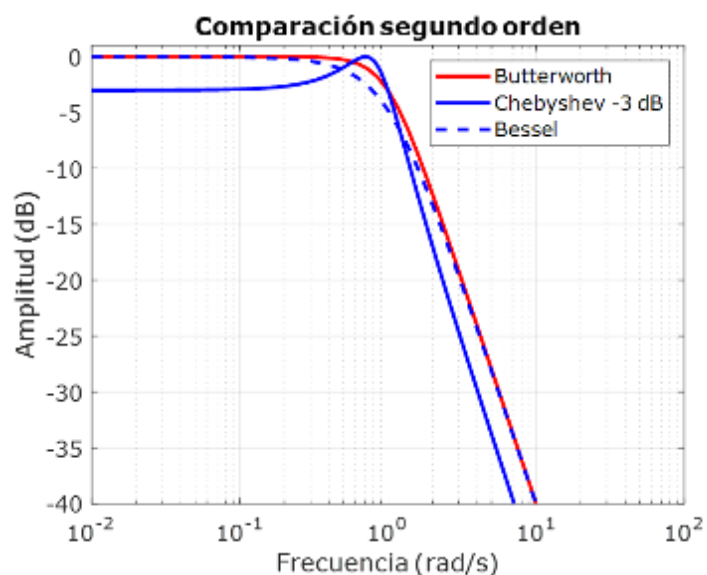


Figura 14. Comparación de las tres aproximaciones para el caso paso-bajas de segundo orden (elaboración propia).

5 Topologías bicuadráticas

Un caso particular de la expresión (2) es

$$G(s) = K \frac{(s+z_1)(s+z_2)}{(s+p_1)(s+p_2)} = K \frac{s^2 + \frac{\omega_z}{Q_z}s + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} = K \frac{s^2 + a_1s + a_0}{s^2 + b_1s + b_0} \quad (6)$$

denominada función de transferencia bicuadrática (Daryanani, 1976). En general, se establece que los polos y los ceros sean tales que $\omega_z = \omega_p$ (Lindquist, 1977).

De la expresión (6) se pueden derivar casos particulares para los diferentes tipos de filtros de segundo orden, como se enlista en la tabla 3.

Tabla 3. Funciones de transferencia para algunos tipos de filtros (elaboración propia).

Tipo de filtro	Función de transferencia
Filtro paso-bajas	$G(s) = K \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
Filtro paso-altas	$G(s) = K \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
Filtro paso-banda	$G(s) = K \frac{\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
Filtro supresor de banda	$G(s) = K \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$
Filtro paso-todo	$G(s) = K \frac{s^2 - \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$

Las topologías bicuadráticas pueden ser de retroalimentación positiva o negativa, según se muestra en la figura 15.

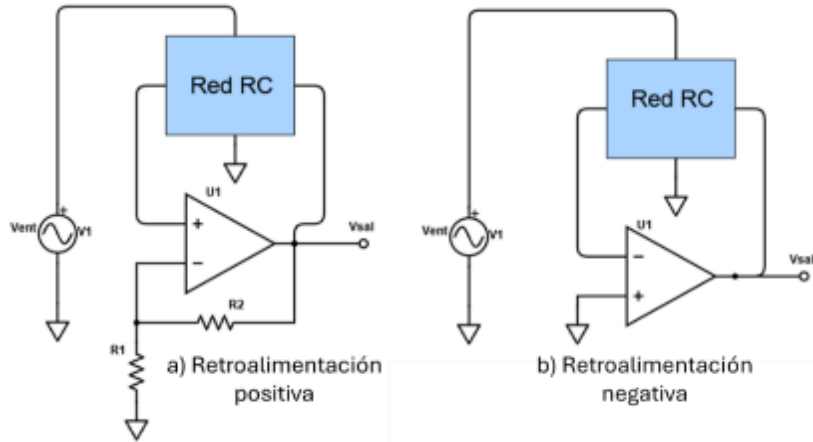


Figura 15. Topologías bicuadráticas (elaboración propia).

Un ejemplo de topología con retroalimentación positiva se muestra en la figura 16. Se trata de un filtro Sallen-Key con elementos pasivos modelados como admitancias. Su función de transferencia se calcula con (7)

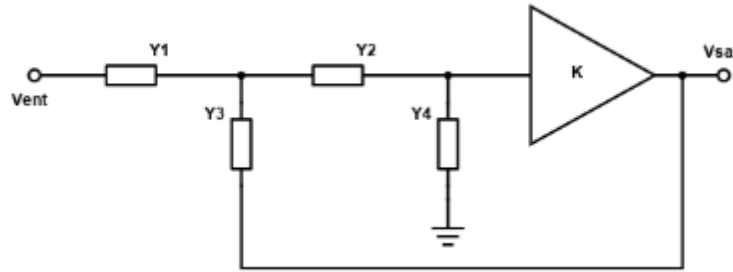


Figura 16. Filtro Sallen-Key (elaboración propia).

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{Y_1 Y_2 K}{Y_1 Y_2 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 + Y_2 Y_3 (1 - K)} \quad (7)$$

Si $Y_1 = \frac{1}{R_1}$, $Y_2 = \frac{1}{R_2}$, $Y_3 = sC_1$, $Y_4 = sC_2$ se tiene

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{\frac{K}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} (1 - K) \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} \quad (8)$$

de donde

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \quad y \quad Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1-K)} \quad (9)$$

Si se quisiera simplificar las expresiones (9) haciendo $R_1 = R_2 = R$ y $C_1 = C_2 = C$ se tendría

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad y \quad Q = \frac{1}{3-K} \quad (10)$$

Si el amplificador tuviera una ganancia unitaria $K=1$, entonces $Q=1/2$ y no podría ajustarse.

Si se define $R_1 = mR, R_2 = R, C_1 = nC, C_2 = C$ y $K = 1$, se tiene un filtro paso-bajas de ganancia unitaria.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K/mnR^2C^2}{s^2 + \left[\frac{1}{RC} + \frac{1}{mnRC}\right]s + \frac{1}{mnR^2C^2}} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} = \frac{a_0}{s^2 + b_1s + b_0} \quad (11)$$

Donde la frecuencia de corte y el factor de calidad se calculan como

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}} \quad (12)$$

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{m+1} \quad (13)$$

La implementación resultante se muestra en la figura 17, que se conoce como filtro paso-bajas Sallen-Key de ganancia unitaria. Los factores m y n son los que permiten ajustar el factor de calidad Q , por lo que ya no depende del valor de los componentes pasivos.

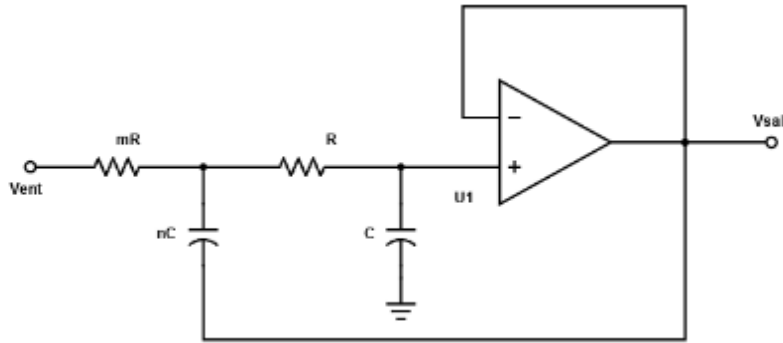


Figura 17. Implementación de un filtro paso-bajas Sallen-Key de ganancia unitaria (elaboración propia).

Ejemplo 1

Se desea diseñar un filtro paso-bajas Sallen-Key de segundo orden, con una frecuencia de corte de 1 kHz y una respuesta Butterworth. Utilice la configuración de ganancia unitaria y determine los valores adecuados de los componentes pasivos.

Solución

De acuerdo con tablas (Franco, 2002), $Q=0.7071$. Se escogen resistencias iguales ($m=1$), $R=1\text{ k}\Omega$. A partir de (13)

$$Q = 0.7071 = \frac{\sqrt{n}}{1 + 1}$$

$$n = (2Q)^2 = (1.4142)^2 = 2$$

De la ecuación (12)

$$C = \frac{1}{2\pi f_c \sqrt{mn} \cdot R} = \frac{1}{2\pi \cdot 1\text{ kHz} \cdot \sqrt{2} \cdot 1\text{ k}\Omega} = 112.54\text{ nF}, \text{ y por lo tanto } nC=225.08\text{ nF}.$$

Para verificar el funcionamiento del filtro se utiliza el simulador LTSpice, y el resultado se muestra en la figura 18.

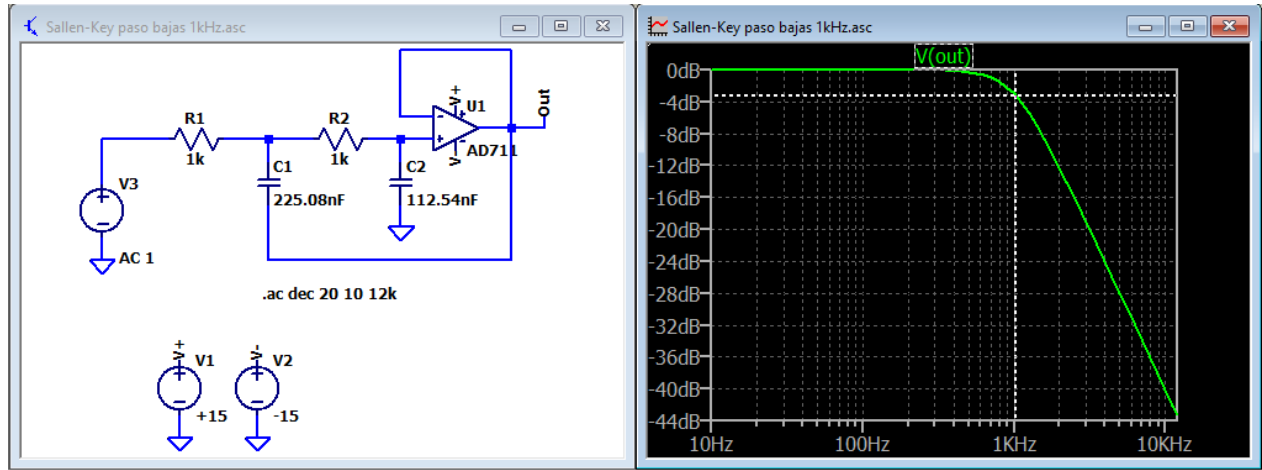


Figura 18. Simulación del filtro paso-bajas Sallen-Key.

Una variante es el filtro paso-bajas Sallen-Key de componentes iguales que se muestra en la figura 19. Haciendo $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, y $K = K$, la expresión (8) queda como

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{K/R^2C^2}{s^2 + RC(3-K)s + \frac{1}{R^2C^2}} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} = \frac{a_0}{s^2 + b_1s + b_0} \quad (14)$$

Donde

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (15)$$

$$Q = \frac{1}{3-K} \quad (16)$$

$$K = 1 + \frac{R_B}{R_A} \quad (17)$$

En este caso, el factor de calidad Q se ajusta mediante las resistencias R_A y R_B , lo cual además añade una ganancia a la banda de paso, que será mayor o igual a 1.

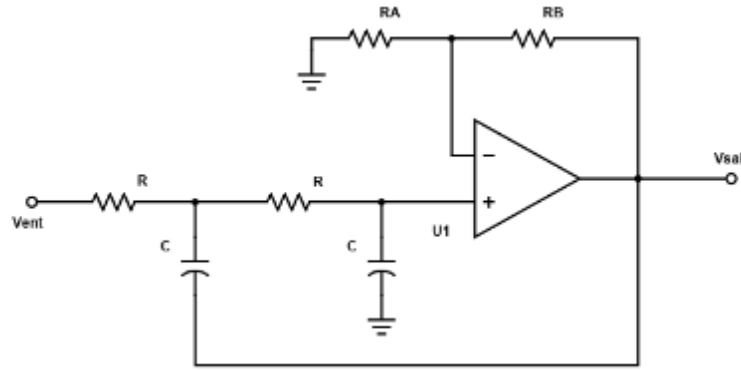


Figura 19. Filtro paso-bajas Sallen-Key de componentes iguales (elaboración propia).

Ejemplo 2

Considere $R=100\text{ k}\Omega$ y $C=1\text{ nF}$. Diseñe un filtro paso-bajas Sallen-Key de componentes iguales y determine la frecuencia de corte.

Solución. De acuerdo con (15)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(100\text{ k}\Omega)(1\text{ nF})} = 1.592\text{ kHz}$$

De tablas se obtiene que $Q=0.7071$, para una aproximación Butterworth. Se propone $R_A=10\text{ k}\Omega$. Utilizando las ecuaciones (16) y (17)

$$R_B = R_A \left(2 - \frac{1}{Q} \right) = 10\text{ k}\Omega \left(2 - \frac{1}{0.7071} \right) = 5.86\text{ k}\Omega$$

Para su implementación se utiliza $R_B=5.9\text{ k}\Omega$. En la figura 20b se puede ver la gráfica de la respuesta en frecuencia obtenida mediante un osciloscopio que cuenta con esa función (Keysight DSOX1202G). La medición aproximada de la frecuencia de corte es de $f_c = 1.614\text{ kHz}$, la cual es un valor cercano al teórico de $f_c = 1.592\text{ kHz}$.



a) Circuito electrónico



b) Respuesta en frecuencia

Figura 20. Respuesta en frecuencia de un filtro Sallen-Key de componentes iguales (elaboración propia).

Si en la expresión (7) se hace $Y_1 = sC_1, Y_2 = sC_2, Y_3 = \frac{1}{R_1}, y_4 = \frac{1}{R_2}$ se obtiene

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{Ks^2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_2C_2} + \frac{1}{R_1C_1}(1-K) \right)s + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} = \frac{Ks^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \quad (18)$$

que es la función de transferencia de un filtro paso-altas de segundo orden. También se puede implementar la topología Sallen-Key de ganancia unitaria y de componentes iguales. Para el caso de ganancia unitaria se puede definir $R_1 = R, R_2 = mR, C_1 = C, C_2 = nC$, y se tiene

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}} \quad (19)$$

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{n+1} \quad (20)$$

El circuito es el mostrado en la figura 21.

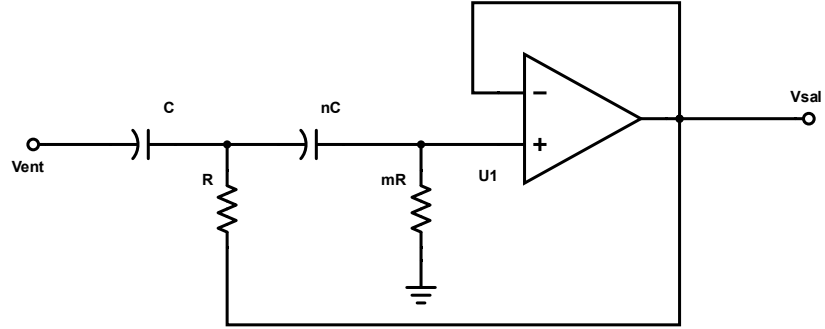


Figura 21. Filtro paso-altas de segundo orden Sallen-Key de ganancia unitaria (elaboración propia).

El filtro paso-altas Sallen-Key de componentes iguales se muestra en la figura 22, y su comportamiento está dado por las expresiones (15), (16) y (17).

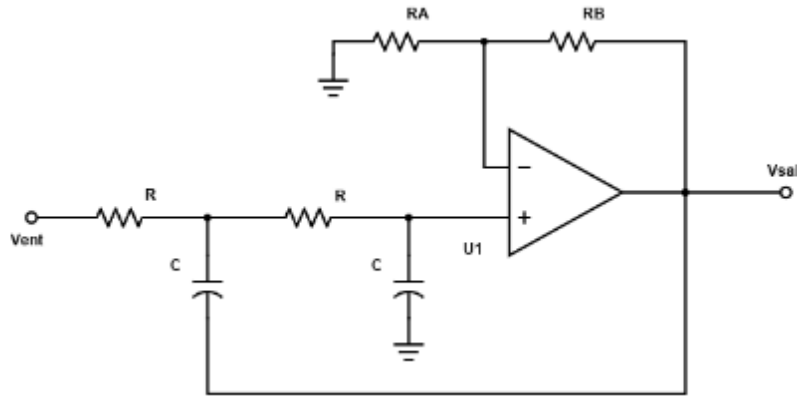


Figura 22. Filtro paso-altas de segundo orden Sallen-Key de componentes iguales (elaboración propia).

Para la implementación de una respuesta paso-banda, a menudo se utiliza la configuración de retroalimentación múltiple de la figura 23, la cual es una topología bicuadrática de retroalimentación negativa. Su funcionamiento queda dado por

$$G(s) = \frac{-\frac{s}{R_1 C}}{s^2 + \left(\frac{1}{2R_2 C}\right)s + \frac{1}{R_1 R_2 C^2}} \quad (21)$$

donde

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C\sqrt{R_1 R_2}} \quad (22)$$

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (23)$$

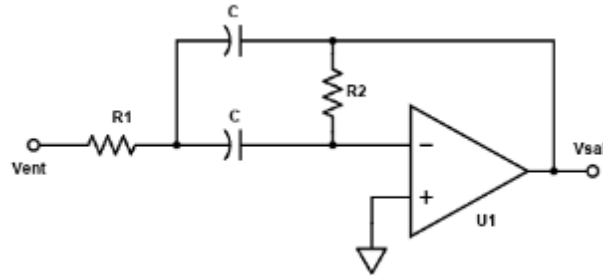


Figura 23. Filtro paso-banda de retroalimentación múltiple (elaboración propia).

La influencia del factor de calidad Q en la respuesta en frecuencia se puede observar en la simulación matemática de la figura 24, para el caso normalizado de $\omega_0 = 1$ [rad/s]. Un incremento en el valor de Q produce una respuesta más selectiva.

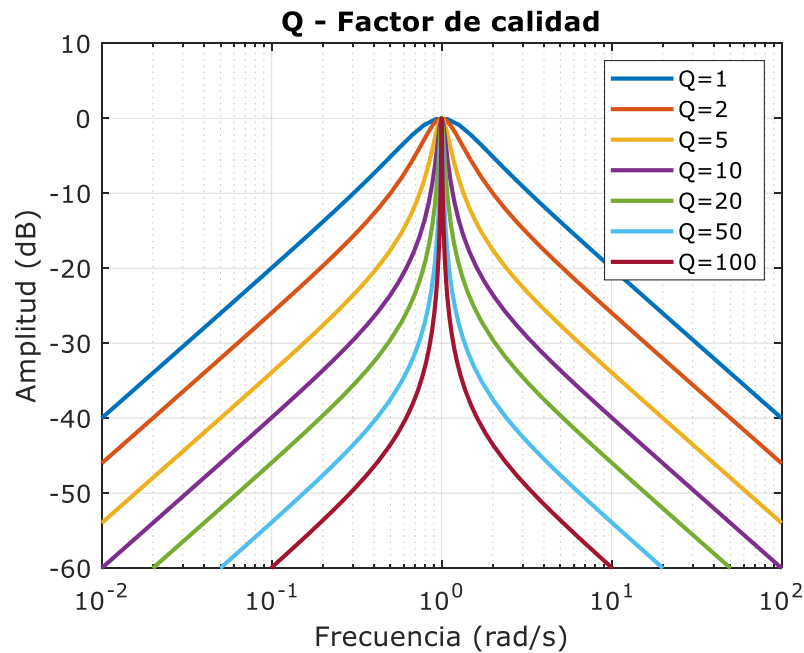


Figura 24. Respuesta en frecuencia de un filtro paso-banda de segundo orden (elaboración propia).

Los filtros paso-banda se caracterizan por tener una frecuencia central f_0 y dos frecuencias de corte f_{c1} y f_{c2} , como se puede ver en la figura 25. Donde, el ancho de banda se define como

$$BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (24)$$

y el factor de calidad queda dado por

$$Q = \frac{f_0}{f_{c2} - f_{c1}} \quad (25)$$

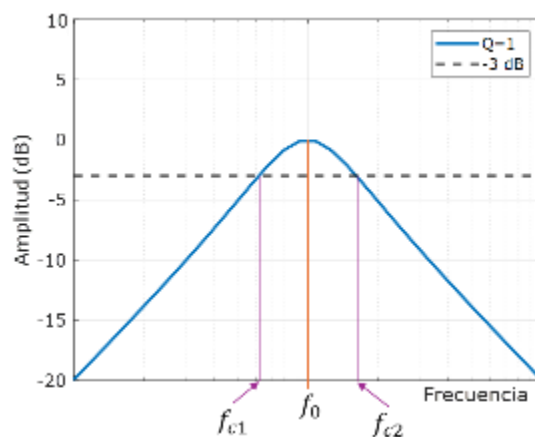


Figura 25. Parámetros de la respuesta de un filtro paso-banda (elaboración propia).

Los filtros de retroalimentación múltiple también cuentan con configuraciones paso-bajas y paso-altas, las cuales se muestran en la figura 26.

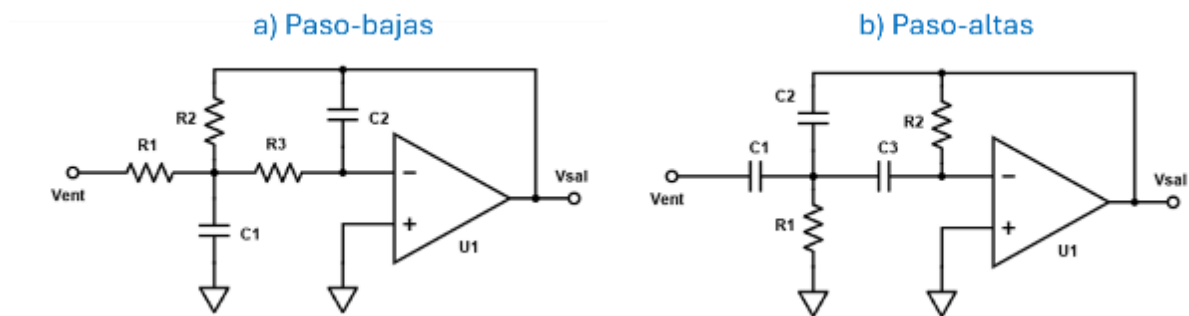


Figura 26. Filtros de retroalimentación múltiple paso-bajas y paso-altas (elaboración propia).

6 Filtros en cascada

La conexión de secciones de segundo orden y secciones de primer orden pueden utilizarse para construir filtros de mayor orden mediante su conexión en cascada, según se muestra en la figura 27. Debe tenerse precaución debido a que al utilizar las funciones de aproximación (Butterworth, Chebyshev y Bessel), las secciones conectadas en cascada no son iguales; es decir, cada sección bicuadrática tiene sus propias ω_0 y Q . La salida de cada una de las etapas es la salida de un amplificador operacional, lo cual proporciona una baja impedancia y permite diseñar cada sección de forma independiente.

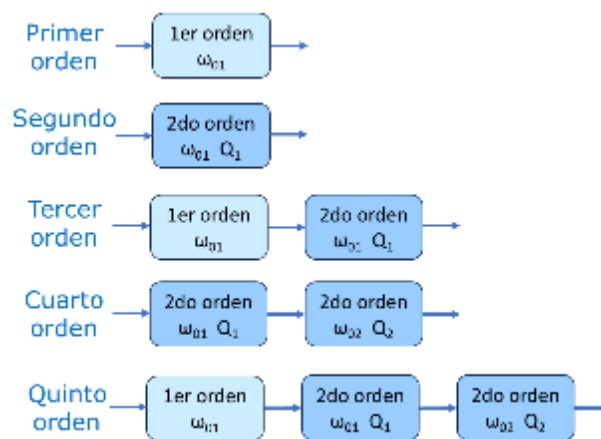


Figura 27. Conexión de filtros en cascada para obtener filtros de mayor orden (elaboración propia).

7 Filtros de variables de estado

Los filtros de variables de estado deben su origen a la época en que se resolvían ecuaciones diferenciales mediante computadoras analógicas, utilizando lo que en teoría de control se denomina "variables de estado". Estos filtros se construyen utilizando tres o cuatro amplificadores operacionales, con dos de ellos funcionando en la configuración de integrador de voltaje. A cambio de un mayor número de amplificadores, se obtiene un diseño que es menos sensible a variaciones de los componentes, menos dependiente de las limitaciones del ancho de banda de los amplificadores y con la capacidad de llegar a factores de calidad $Q > 10$ (Franco, 2002). Este tipo de filtros puede proporcionar

simultáneamente salidas paso-bajas, paso-altas y paso-banda. En la figura 28 se muestra un filtro de variables de estado tipo inversor.

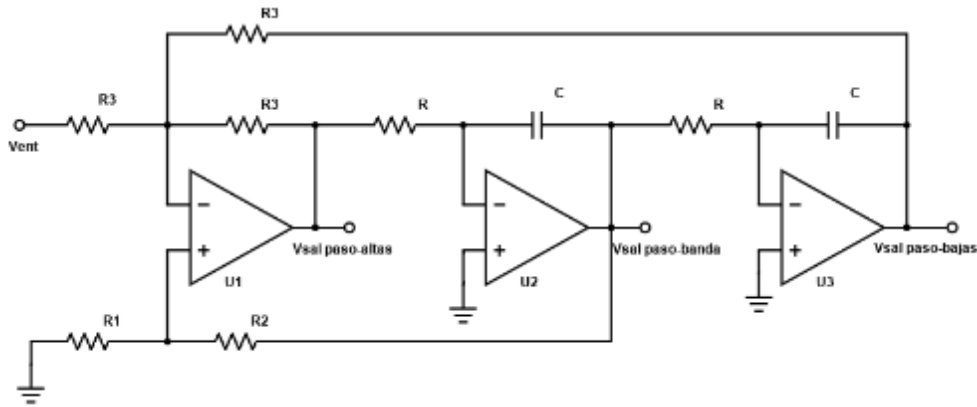


Figura 28. Filtro de variables de estado tipo inversor (elaboración propia).

La frecuencia de corte de las salidas paso-bajas, paso-altas, así como la frecuencia central del paso-banda está dada por

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (26)$$

$$Q = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (27)$$

Una configuración no-inversora de filtro de variables de estado se tiene en la figura 29, donde de manera similar al caso inversor se tiene

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (28)$$

$$Q = 1 + \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1} \quad (29)$$

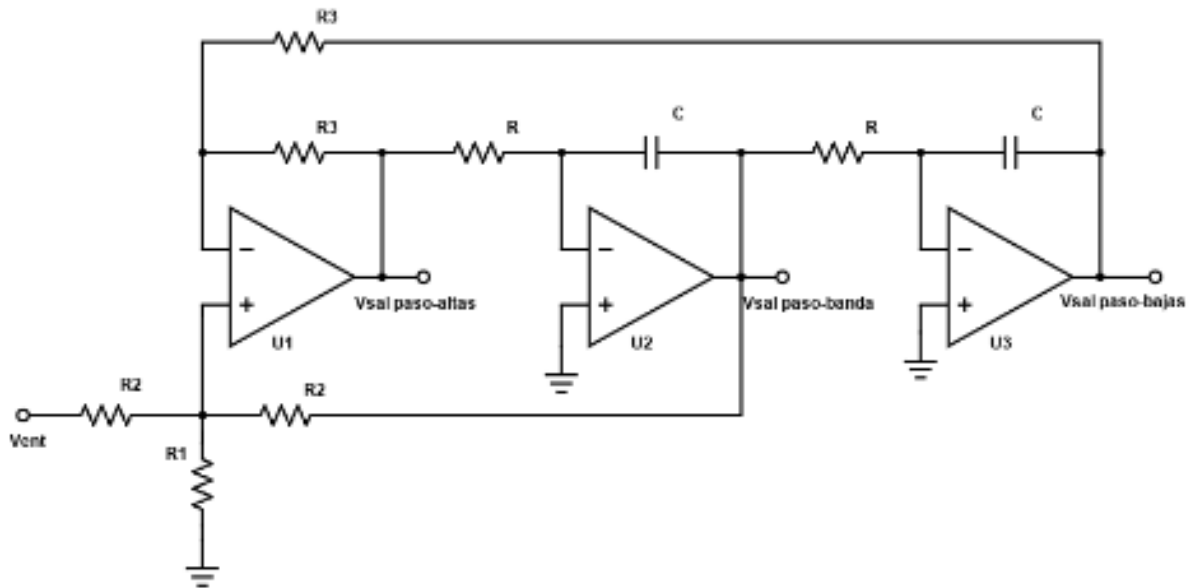


Figura 29. Filtro de variables de estado no-inversor (elaboración propia).

Una simulación de las tres salidas de un filtro de variables de estado se muestra en la figura 30. Ahí se puede observar que las frecuencias de corte de la respuesta paso-bajas y paso altas coinciden con la frecuencia central de la salida paso-banda.

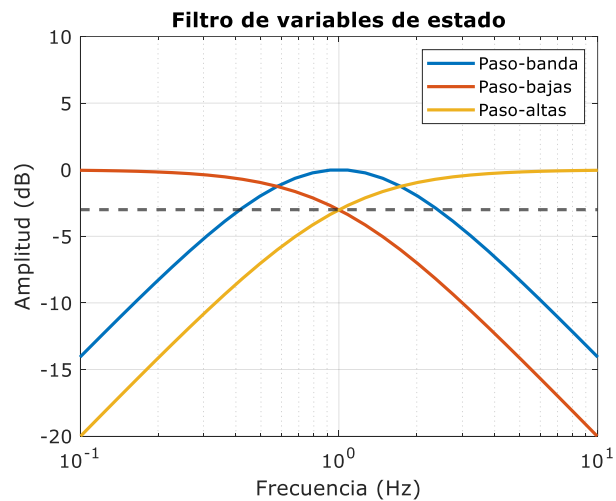


Figura 30. Respuesta en frecuencia de un filtro de variables de estado (elaboración propia).

8 Diseño de filtros activos

Para el diseño y síntesis de filtros activos se puede seguir el siguiente procedimiento:

1. Definir las especificaciones del filtro.
 - a. Tipo de filtro. Paso-bajas, paso-altas, paso-banda, supresor de banda.
 - b. Frecuencias de corte y de supresión, o frecuencia central y factor de calidad Q .
 - c. Ganancia en la banda de paso.
 - d. Ganancia en la banda de supresión.
2. Seleccionar el tipo de aproximación: Butterworth, Chebyshev, Bessel u otra.
3. Determinar el orden del filtro.
4. Descomponer el filtro en secciones de primer orden y/o segundo orden.
5. Determinar los parámetros de cada sección: f_0, Q, K .
6. Seleccionar una topología: Sallen-Key, retroalimentación múltiple u otra.
7. Definir el valor de los componentes pasivos.
8. Seleccionar un amplificador operacional.
9. Opcionalmente, simular el comportamiento del circuito para comprobar las especificaciones.

8.1 Ejemplo de diseño

Como se mencionó en las secciones precedentes, una de las funciones más utilizadas de los filtros activos es el procesamiento de una señal mediante la amplificación de un intervalo de frecuencias y la atenuación de las que no son de interés. Una de las características que se debe seleccionar primero es el orden del filtro, y para ello se utiliza una plantilla de diseño de un filtro paso-bajas como la mostrada en la Figura 31. El orden del filtro depende de cuatro parámetros enlistados en la Tabla 4. A partir de ellos se define la atenuación requerida como $A_{paso} - A_{supresión}$.

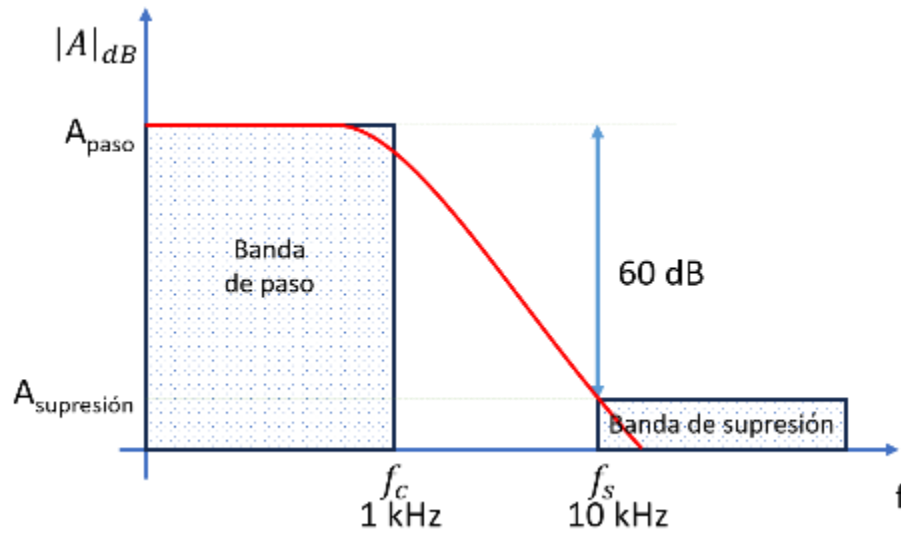


Figura 31. Ejemplo de una plantilla de diseño (elaboración propia).

Tabla 4 Parámetros de la plantilla de diseño (elaboración propia).

Parámetro	Definición
A_{paso}	Ganancia en la banda de paso
$A_{\text{supresión}}$	Ganancia en la banda de supresión
f_c	Frecuencia de corte
f_s	Frecuencia de supresión

Como ejemplo, supóngase que se debe digitalizar una señal que tiene un ancho de banda de $f_c = 1 \text{ kHz}$ y se desea que la ganancia en la banda de paso sea lo más plana posible, lo cual nos sugiere que se emplee una aproximación Butterworth. Esta señal se digitalizará mediante un convertidor analógico-digital de 10 bits. Se desea que todas las señales mayores a 10 kHz (f_s) sean menores al equivalente a un bit. Esto lo podemos redondear a una atenuación de 60 dB (pérdida en dB), dado que se trata de una relación de 1 a 1000 (10 bits implican 1024 niveles de cuantización).

$$Pérdida \text{ en dB} = PdB = 20 \log_{10}(1024) = 60.206 \text{ dB}$$

O también $PdB = A_{paso} - A_{supresión} [dB]$

Para el caso de un filtro Butterworth su orden se puede estimar mediante

$$n = INT \left\{ \frac{\log(10^{0.1PdB} - 1)}{2 \log(f_s/f_c)} \right\} + 1 \quad (30)$$

Por lo tanto, $n=3$ y se puede implementar con una etapa de primer orden en cascada con una de segundo orden.

De tablas de coeficientes de filtros (Daryanani, 1976) se obtienen los valores mostrados en la Tabla 4.

Tabla 5. Coeficientes para un filtro de tercer orden (elaboración propia).

f_{01}	Q_1	f_{02}
1 kHz	1	1 kHz

Utilizando una etapa Sallen-Key de ganancia unitaria y una etapa de primer orden. Mediante las ecuaciones (1), (12) y (13) se puede llegar a determinar los componentes que aparecen en la figura 31, donde también se muestra la simulación en LTSpice de la respuesta en frecuencia y se observa que satisface las condiciones de diseño.

El filtro de este ejemplo puede ser utilizado para evitar el fenómeno de ‘aliasing’ o traslape en el proceso de digitalización de la señal. También es posible llegar a una solución similar utilizando herramientas de diseño asistido por computadora como el Analog Filter Wizard de Analog Devices, el cual es una herramienta de uso libre disponible en línea.

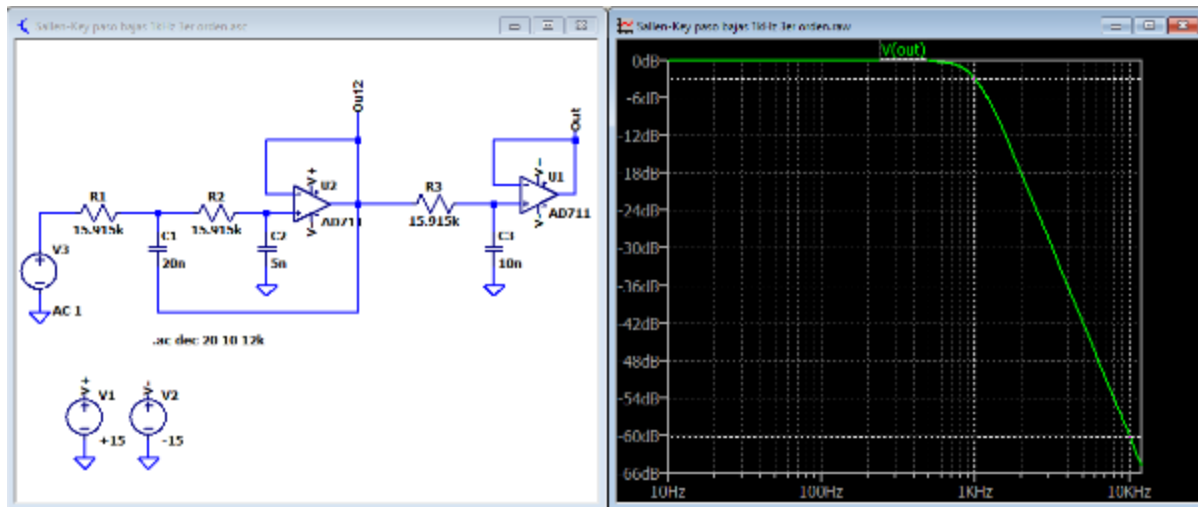


Figura 32. Filtro Butterworth de tercer orden con $f_c = 1 \text{ kHz}$ (elaboración propia).

REFERENCIAS

Daryanani, G. (1976). *Principles of active network synthesis and design*. John Wiley and Sons.

Franco, S. (2002). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits* (3rd ed.). McGraw-Hill Higher Education.

Lindquist, C. (1977). *Active network design with signal filtering applications*. Steward & Sons.

Martinek, R., et al. (2021). Advanced bioelectrical signal processing methods: Past, present and future approach—Part I: Cardiac signals. *Sensors*, 21(15).
<https://doi.org/10.3390/s21155186>

Pactitis, S. A. (2007). *Active filters: Theory and design*. CRC Press.

Stanley, W. (1990). *Operational amplifiers with linear integrated circuits* (2nd ed.). Merrill Publishing Company.

ANEXOS

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 8

Filtro paso-bajas

```
% Respuesta en frecuencia de un filtro paso-bajas RC
% Low_pass_RC.m
clf
opts = bodeoptions('cstprefs');
opts.FreqUnits = 'Hz';
num=1;
den=[1/(1000) 1];
SYS=tf(num, den);
w=logspace(1,5,10000);
%[mag,phase,wout] = bode(SYS,{1,10000});
[mag,phase,wout] = bode(SYS,w);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)
grid on
hold on
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud (dB)')
title('Filtro paso-bajas de primer orden')
```

Filtro paso-altas

```
% Respuesta en frecuencia de un filtro paso-bajas RC
% High_pass_RC.m
clf
opts = bodeoptions('cstprefs');
opts.FreqUnits = 'Hz';
num=[1/1000 0];
den=[1/(1000) 1];
SYS=tf(num, den);
w=logspace(1,5,10000);
%[mag,phase,wout] = bode(SYS,{1,10000});
[mag,phase,wout] = bode(SYS,w);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)
grid on
hold on
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud (dB)')
title('Filtro paso-altas de primer orden')
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 10

```
% Second_order_Q.m
clf
% opts = bodeoptions('cstprefs');
% opts.FreqUnits = 'Hz';
Q=[0.25 0.5 0.75 1 2 5 10];
w0=1;
num=w0^2;

for i=1: length(Q)
    den=[1 w0/Q(i) w0^2];
    %bode(num, den, opts);
    SYS=tf(num, den);
    [mag,phase,wout] = bode(SYS,{0.01,20});
    semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)
    grid on
    hold on
end
%grid on
%set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1)
axis([0.01 20 -40 30])
legend('Q=0.25','Q=0.5','Q=0.75', 'Q=1','Q=2','Q=5','Q=10')
title('Q - Factor de calidad')
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 11

Respuesta Butterworth

```
% Butterworth_filter.m
% Segundo orden, normalizado
num=[1];
den=[1 1.4142 1];
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), '-r', 'LineWidth',2)
grid on
title('Aproximación Butterworth')
axis([0.01 10000 -80 1])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
```

Respuesta Bessel

```
% Bessel_filter.m
% Segundo orden normalizado

num=[1];
den=[1 1.7321 1];
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), '-r', 'LineWidth',2)
grid on
title('Aproximación Bessel')
axis([0.01 10 -20 1])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 12

```
% Butterworth_filter_order.m
% Orden 2 al 6

clf
[z,p,k] = buttap(2);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2, 'DisplayName','n=2')
grid on
title('Aproximación Butterworth')
axis([0.01 10000 -80 1])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
hold on

[z,p,k] = buttap(3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=3')

[z,p,k] = buttap(4);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=4')

[z,p,k] = buttap(5);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=5')

[z,p,k] = buttap(6);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=6')

legend
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 13

Filtro Chevyshev

```
% Cheby_filter_order.m
% Rizo -3 dB. Orden 2 al 6
clf
[z,p,k] = cheb1ap(2,3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=2')
grid on
title('Aproximación Chebyshev 3 dB')
axis([0.01 10 -20 1])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
hold on

[z,p,k] = cheb1ap(3,3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=3')

[z,p,k] = cheb1ap(4,3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=4')

[z,p,k] = cheb1ap(5,3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=5')

[z,p,k] = cheb1ap(6,3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=6')

legend
```

Filtro Bessel

```
% Bessel_filter_order.m
% Orden 2 al 6
clf
[z,p,k] = besslap(2);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=2')
grid on
title('Aproximación Bessel')
axis([0.01 10 -20 1])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
hold on

[z,p,k] = besslap(3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=3')

[z,p,k] = besslap(4);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=4')

[z,p,k] = besslap(5);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=5')

[z,p,k] = besslap(6);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2,'DisplayName','n=6')

legend
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 14

```
% Butt_Cheb_Bess.m
% Compara las respuestas de segundo orden. Cheby -3 dB

clf
[z,p,k] = buttap(2);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), '-r', 'LineWidth',2, 'DisplayName','Butterworth')
grid on
title('Comparación segundo orden')
axis([0.01 100 -40 1])
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (rad/s)')
ylabel('Amplitud (dB)')
hold on

[z,p,k] = cheblap(2,3);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), '-b', 'LineWidth',2, 'DisplayName','Chebyshev -3 dB')

[z,p,k] = besslap(2);
[num,den] = zp2tf(z,p,k);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS);
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), '--b', 'LineWidth',2, 'DisplayName','Bessel')

legend
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 24

```
% Band_pass_Q_f.m
clf
% opts = bodeoptions('cstprefs');
% opts.FreqUnits = 'Hz';
Q=[1 2 5 10 20 50 100];
f0=1;

for i=1: length(Q)
    num=[f0/Q(i) 0];
    den=[1 f0/Q(i) f0^2];
    %bode(num, den, opts);
    SYS=tf(num, den);
    [mag,phase,fout] = bode(SYS,{0.01,100});
    semilogx(fout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)
    grid on
    hold on
end
%grid on
%set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',1)
axis([0.01 100 -60 10])
legend('Q=1','Q=2','Q=5','Q=10','Q=20','Q=50','Q=100')
title('Q - Factor de calidad')
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud (dB)')
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 25

```
% Band_pass_Q1.m
clf
% opts = bodeoptions('cstprefs');
% opts.FreqUnits = 'Hz';
Q=1;
w0=1;

num=[w0/Q 0];
den=[1 w0/Q w0^2];
%bode(num, den, opts);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS,{0.01,100});
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)
grid on
hold on

axis([0.1 10 -20 10])
yline(-3,"--", 'LineWidth',2)
legend('Q=1', '-3 dB')

title('Factor de calidad Q')
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud (dB)')
```

Código de MATLAB para generar las gráficas de la figura 30

```
% Variables_de_estado.m
clf
% opts = bodeoptions('cstprefs');
% opts.FreqUnits = 'Hz';
Q=0.5;
w0=1;

num=[w0/Q 0];
den=[1 w0/Q w0^2];
%bode(num, den, opts);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS,{0.01,100});
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)
grid on
hold on

num=[1]; %Low-pass
den=[1 1];
%bode(num, den, opts);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS,{0.01,100});
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)

num=[1 0]; %High-pass
den=[1 1];
%bode(num, den, opts);
SYS=tf(num, den);
[mag,phase,wout] = bode(SYS,{0.01,100});
semilogx(wout, 20*log10(squeeze(mag)), 'LineWidth',2)

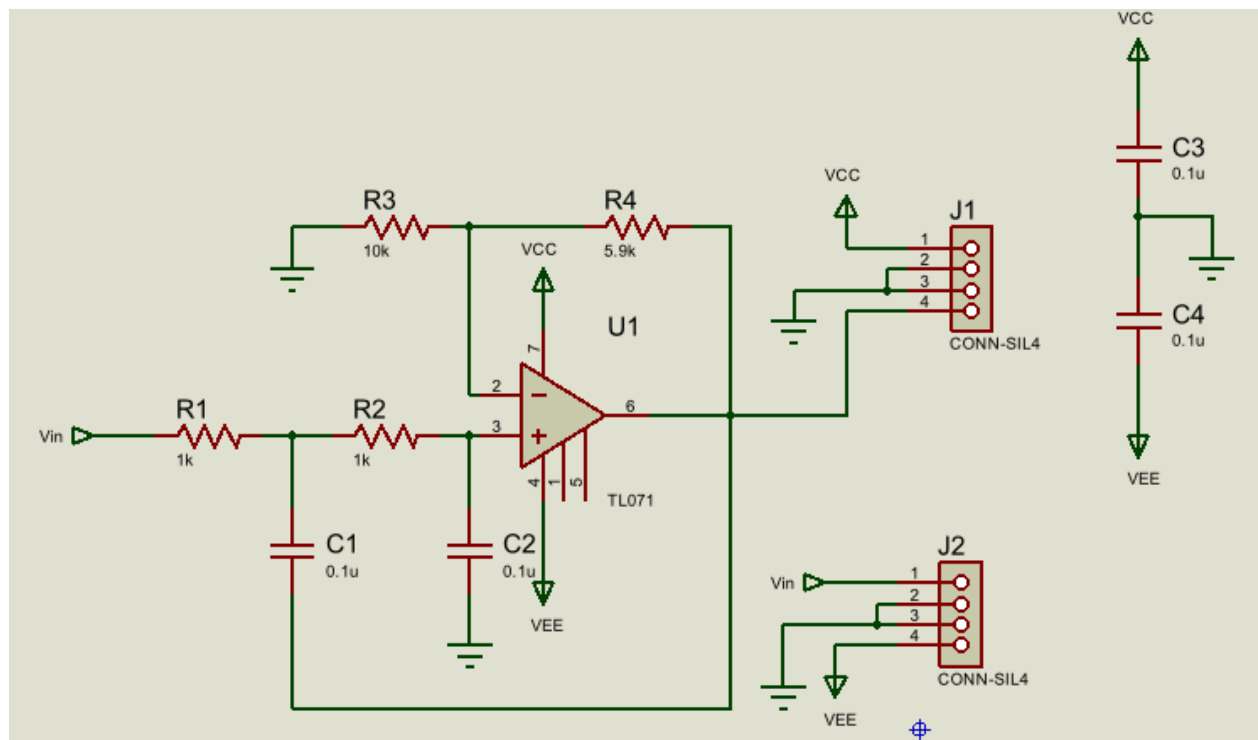
axis([0.1 10 -20 10])
yline(-3,"--", 'LineWidth',2)
legend('Paso-banda', 'Paso-bajas', 'Paso-altas')

title('Filtro de variables de estado')
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Verdana','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud (dB)')
```

Lista de partes del circuito de la figura 20

Referencia	Descripción	Valor
C1-C4	Capacitor cerámico 50 V X7R 0805	0.1 uF
R1-R2	Resistencia de carbón multicapa 5% 1/8W 0805	1 kΩ
R3	Resistencia de carbón multicapa 5% 1/8W 0805	10 kΩ
R4	Resistencia de carbón multicapa 5% 1/8W 0805	5.9 kΩ
U1	TL071 Amplificador operacional SOIC8	
J1-J2	Conector 4 pines tipo peine una fila	

Diagrama esquemático del circuito de la figura 20



Plano del circuito impreso del filtro de la figura 20

