

Filtros pasa-bajas de tercer y quinto orden

Filtro Butterworth

Diana Laura Contreras Alonso

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
Facultad de electrónica
21 sur, 1103. Barrio Santiago Puebla, Puebla, México
dianalaura.contreras@upaep.edu.mx

Alfonso Cesar Arellano Ventura

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
Facultad de electrónica
21 sur, 1103. Barrio Santiago Puebla, Puebla, México
alfonsocesar.arellano@upaep.edu.mx

Jair Isael Arce Huerta

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
Facultad de electrónica
21 sur, 1103. Barrio Santiago Puebla, Puebla, México
jairisael.arce@upaep.edu.mx

Axel Arriola Fonseca

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
Facultad de electrónica
21 sur, 1103. Barrio Santiago Puebla, Puebla, México
axel.arriola@upaep.edu.mx

Abstract—This is a practice report about 3rd and 5th order Sallen-Key electronic low-pass filters, focusing on Butterworth and Bessel filters

Keywords—electronic, Sallen-Key, filter, Butterworth, n order.

I. INTRODUCCIÓN

Un filtro es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase. El propósito de los filtros es separar la información de interferencias, ruido y distorsión no deseada.

Los filtros son circuitos especializados en tratar de distinta forma (eg. amplificar y desfazar más o menos) a los armónicos según su frecuencia. Si en cualquier circuito analógico introdujeramos una señal compuesta de armónicos de todas las frecuencias, veríamos que trata de distinta forma a unos armónicos que a otros dependiendo de su frecuencia. Esto puede considerarse como distorsión de la señal de entrada.

II. FILTROS ELECTRÓNICOS

Un filtro es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase. El propósito de los filtros es separar la información de interferencias, ruido y distorsión no deseada.

Los filtros son circuitos especializados en tratar de distinta forma (eg. amplificar y desfazar más o menos) a los armónicos según su frecuencia. Si en cualquier circuito

analógico introdujeramos una señal compuesta de armónicos de todas las frecuencias, veríamos que trata de distinta forma a unos armónicos que a otros dependiendo de su frecuencia. Esto puede considerarse como distorsión de la señal de entrada.

Este tipo de filtro deja pasar todas las frecuencias desde 0 a la frecuencia de corte y bloquea las frecuencias que están sobre esta. A las frecuencias que se ubican entre 0 hasta la frecuencia de corte se le denomina banda pasante mientras que las frecuencias que están por encima de la frecuencia de corte se le denomina banda eliminada. Las zonas entre la banda pasante y la banda eliminada se le llama banda de transición.

En la “Fig. 1”, se puede apreciar el comportamiento del filtro pasa bajas ideal.

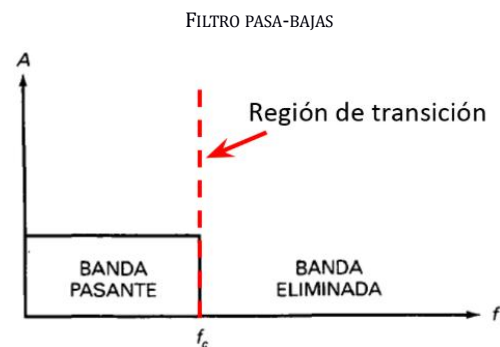


Fig. 1 Gráfica de frecuencia de un filtro pasa-bajas

Los filtros se dividen en pasivos (su orden se clasifica en función del número de componentes pasivos) y en activos (su orden se clasifica en función de componentes activos o circuitos RC). Los filtros tienen una pendiente de $20n$ [db/década], siendo “n” el orden del filtro.

A. Filtro Butterworth

El filtro de Butterworth es uno de los filtros electrónicos 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.

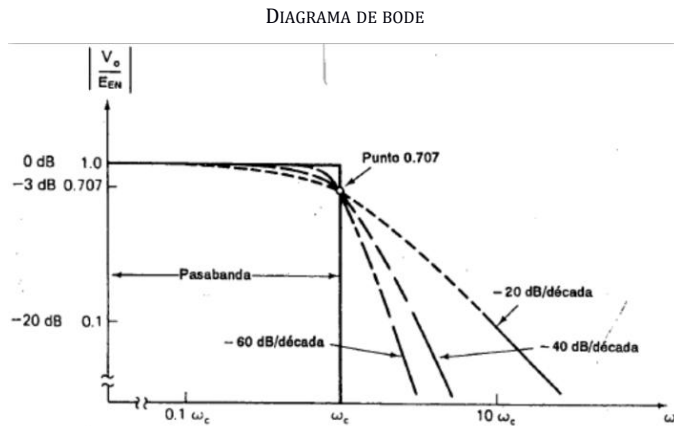


Fig. 2 Diagrama de Bode para filtros Butterworth de orden 'n'

B. Filtro Bessel

Un filtro Bessel es un tipo de filtro lineal analógico con un retardo máximo de fase / grupo plano (respuesta de fase lineal máxima), que conserva la forma de onda de las señales filtradas en la banda de paso. Los filtros de Bessel se utilizan a menudo en sistemas de cruce de audio.

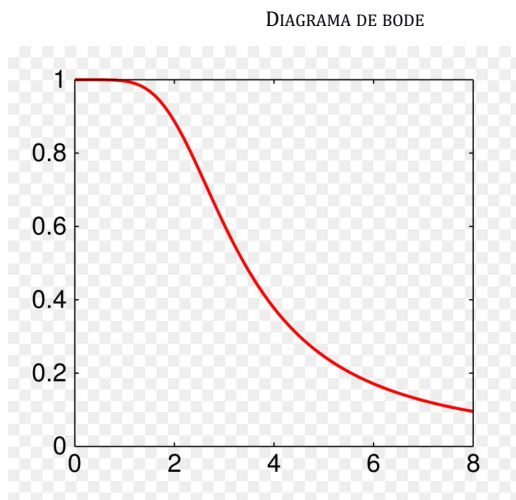


Fig. 3 Diagrama de Bode para filtro Bessel

C. Filtro pasa-bajas: orden "n" Sallen Key

Los filtros Sallen Key, son filtros activos de 2 o 3 polos pasa bajas, con 2 o 3 capacitores y 2 o 3 resistencias, estos circuitos son bastantes simples, para generar un orden

superior se puede generar una cascada de varias etapas. Los filtros Sallen Key generan respuestas Butterworth, Bessel y Chebyshev.

Como se puede observar en la Fig 2, la pendiente de caída del filtro va aumentando conforme se aumenta el orden, sin embargo, al aumentar el orden, el circuito se vuelve más complejo, ya sea activo o pasivo. Por ejemplo, un filtro pasa-bajas de orden 4, tiene 4 resistores y 4 capacitores, pero su pendiente es de 100 db/década, además en el caso de los filtros Sallen-Key, por cada amplificador operacional se puede llegar a un filtro de tercer orden, es decir que si queremos construir un filtro de orden mayor a 3, debemos conectar 2 circuitos en serie como se observa en la Fig 3. Si fuera de orden 5, sería un orden 3 en serie con un orden 2, el orden no importa.

FILTRO PASA-BAJAS 4TO ORDEN

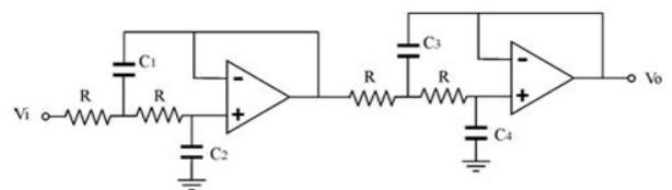


Fig. 4
orden

Filtro pasa-bajas Sallen-key de cuarto

Sin embargo, para la realización de filtros de orden "n", es necesario aplicar una normalización a los valores de frecuencia, esto con el fin de obtener una constante que generalizada para obtener los valores de los componentes del filtro, en el caso de un filtro pasa-bajas, se aplican filtros Sallen-Key de componentes iguales, es decir que, como se muestra en la Fig 4, las resistencias siempre van en serie y estas son iguales, a diferencia de los capacitores que se debe obtener este valor con la constante normalizada, para el caso de pasa-bajas se aplican el siguiente método.

.D. Método de normalización por resistencias constantes

Para este método, se necesitan 4 datos, la frecuencia banda pasante (fp), frecuencia banda de supresión (fs), atenuación banda pasante (Ap) y atenuación banda de supresión (As). Partiendo de estos datos, se puede crear el filtro que cumpla esas condiciones, primero se calcula el orden del filtro (n).

$$n = \frac{\log(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1})}{\log(\frac{f_s}{f_p})} \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \sqrt{10^{0.1 \cdot A_p} - 1} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \sqrt{10^{0.1 \cdot A_s} - 1} \quad (3)$$

Primero obtenemos ϵ^1 (fórmula 1) y ϵ^2 (fórmula 2) con A_p y A_s , posteriormente se aplica la fórmula 3 para obtener el orden del filtro. A continuación se usa una tabla para determinar las constantes de los capacitores.

Ahora solo resta multiplicar C_n por los valores de las constantes para cada capacitor, es decir, $C1=C_n \cdot K$. Finalmente se construye el filtro con los valores obtenidos de los capacitores aplicando la estructura de la Fig 4..

III. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Ahora bien, pasamos al diseño y desarrollo de filtros de orden superior, en esta práctica se realizó la simulación de dos filtros, el primero de ellos de tercer orden y el segundo filtro de quinto orden. A continuación, con ayuda del software Multisim, simularemos ambos filtros pasa bajas.

VALORES CAPACITORES

Tabla 13.2 Valores para pasa-bajas activo Butterworth.*

Orden n	$C_1=C$ o $R=R_1$	$C_2=C$ o $R=R_2$	$C_3=C$ o $R=R_3$
2	1.414	0.7071	
3	3.546	1.392	0.2024
4	1.082	0.9241	
	2.613	0.3825	
5	1.753	1.354	0.4214
	3.235	0.3090	
6	1.035	0.9660	
	1.414	0.7071	
	3.863	0.2588	
7	1.531	1.336	0.4885
	1.604	0.6235	
	4.493	0.2225	
8	1.020	0.9809	
	1.202	0.8313	
	1.800	0.5557	
	5.125	0.1950	
9	1.455	1.327	0.5170
	1.305	0.7661	
	2.000	0.5000	
	5.758	0.1736	
10	1.012	0.9874	
	1.122	0.8908	
	1.414	0.7071	
	2.202	0.4540	
	6.390	0.1563	

a-Valores capacitores

Fig. 5 Tabla para método de normalización

Ya que se tiene el orden del filtro, se busca en la primera columna y se usan las constantes para dicho caso, por ejemplo para un 5to orden, la distribución de los valores nos indica que se armara con un filtro de 3er orden y uno de 2do orden, para uno de 7mo orden seria 1 de 3er orden y 2 de 2do orden. Ahora se propone el valor de la resistencia, ya que todas serán iguales y se utiliza la siguiente fórmula para conocer C_n , que es el valor del capacitor a multiplicar por las constantes de la Fig. 4.

$$C_n = \frac{1}{2\pi R f_p} \quad (4)$$

Filtro 1:

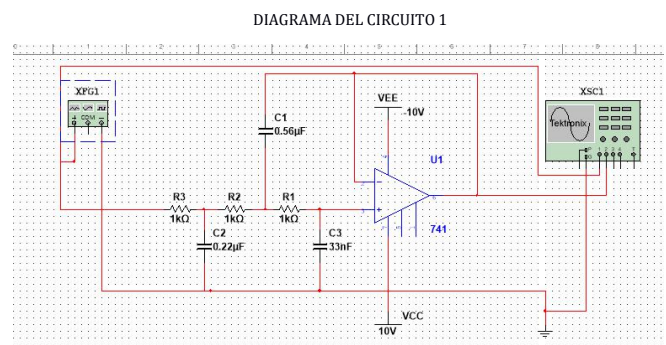


Fig. 5.1

Diagrama del circuito 1

Datos:

$$\begin{aligned} A_p &= 3db \\ f_p &= 1kHz \\ A_s &= 40db \\ f_s &= 5kHz \\ R &= 1k\Omega \end{aligned}$$

fórmulas:

$$n = \frac{\log(\epsilon_2)}{\log(\epsilon_1)} \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \sqrt{10^{0.1 \cdot A_p} - 1} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \sqrt{10^{0.1 \cdot A_s} - 1} \quad (3)$$

Calculado (1), (2) y (3), obtenemos:

$$n = 2.865 \approx 3$$

$$C_n = \frac{1}{2\pi R f_p}$$

$$C_n = 1.59 \times 10^{-7}$$

Cálculo de capacitores

$$C_1 = 1.753 * 1.98 \times 10^{-8} = 33nF$$

$$C_2 = 1.354 * 1.98 \times 10^{-8} = 27nF$$

$$C_3 = 0.4214 * 1.98 \times 10^{-8} = 8.2nF$$

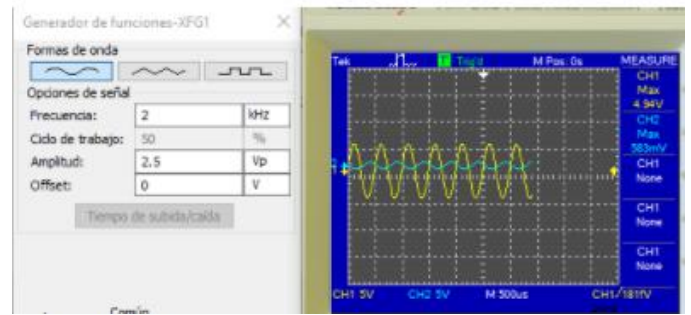


Fig. 7.1 Voltaje de entrada y salida una década después de la frecuencia de corte.

Simulación:

GRAFICA VOLTAJE/TIEMPO

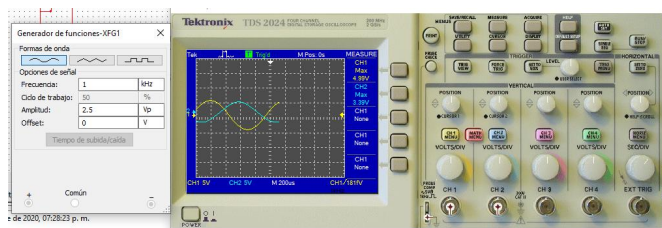


Fig. 6 Señal de entrada y salida en frecuencia de corte.

GRAFICA VOLTAJE/TIEMPO

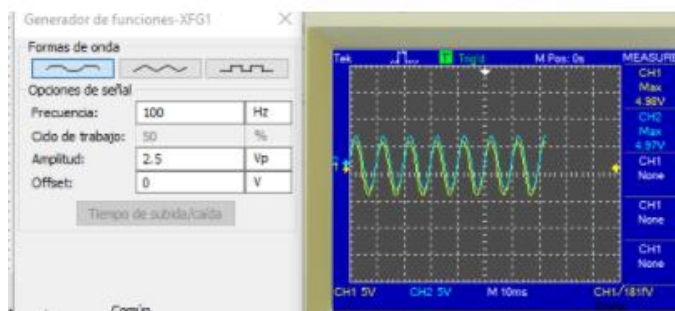


Fig. 7 Voltaje de entrada y salida una década antes de la frecuencia de corte.

GRAFICA VOLTAJE/TIEMPO

Filtro 2

DIAGRAMA CIRCUITO 2

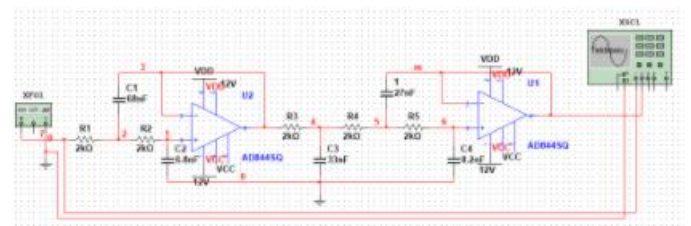


Fig. 9

Diagrama del circuito 2

Datos:

$$A_p = 3$$

$$f_p = 4kHz$$

$$A_s = 30dB$$

$$f_s = 8kHz$$

$$R = 2k\Omega$$

Fórmulas:

$$n = \frac{\log(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1})}{\log(\frac{f_s}{f_p})} \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \sqrt{10^{0.1 \cdot A_p} - 1} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \sqrt{10^{0.1 \cdot A_s} - 1} \quad (3)$$

Calculado (1), (2) y (3), obtenemos:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= 0.9976 \\ \epsilon_2 &= 31.6070 \\ n &= 4.9856 \approx 5 \\ C_n &= \frac{1}{2\pi R f_p} \\ C_n &= 1.98 \times 10^{-8}\end{aligned}$$

Para obtener el valor de los capacitores, multiplicamos el valor del factor de escala (C_n) con el valor correspondiente a cada etapa.

$$C_1 = 1.753 * 1.98 \times 10^{-8} = 33 \text{ nF}$$

$$C_2 = 1.354 * 1.98 \times 10^{-8} = 27 \text{ nF}$$

$$C_3 = 0.4214 * 1.98 \times 10^{-8} = 8.2 \text{ nF}$$

$$C_4 = 3.235 * 1.98 \times 10^{-8} = 68 \text{ nF}$$

$$C_5 = 0.3090 * 1.98 \times 10^{-8} = 6.8 \text{ nF}$$

Simulación:

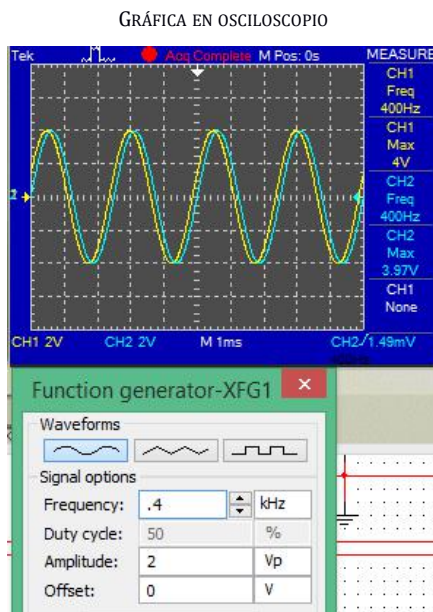


Fig.9 Señal de entrada y salida del filtro pasa bajas, graficada una década antes de su frecuencia de corte.

En la “Fig. 9.” se muestra la gráfica de la señal de entrada y salida a una década antes de su frecuencia de corte, en esta, ambas señales son casi iguales, esto quiere decir que prácticamente la señal de salida pasa por completo.

GRÁFICA EN OSCILOSCOPIO

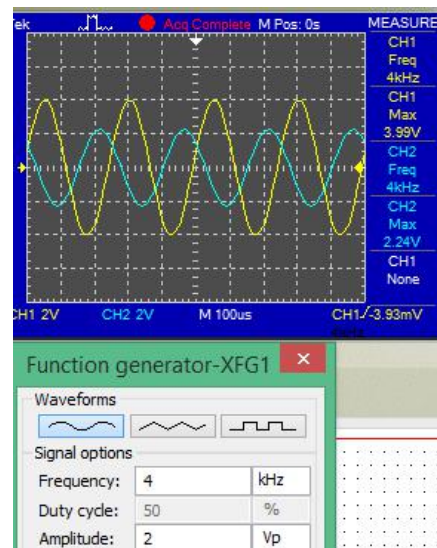


Fig. 10 Señal de entrada y salida del filtro pasa bajas, graficada en su frecuencia de corte.

La “Fig. 10” muestra la gráfica de los voltajes de entrada y salida, en esta ocasión vemos como el voltaje de salida empieza a disminuir, esto se debe a la multiplicación de $V_{in} * 0.707$.

GRÁFICA EN OSCILOSCOPIO

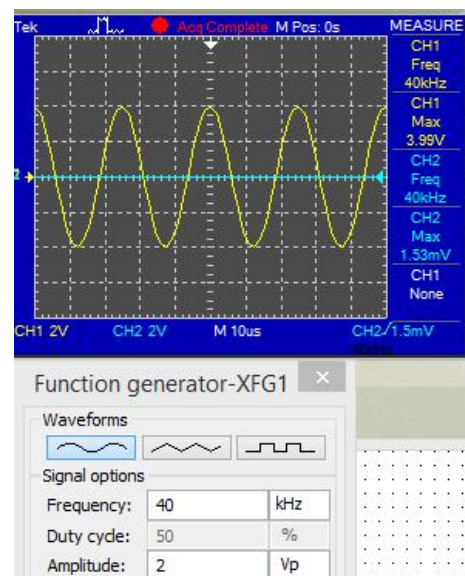


Fig. 10 Señal de entrada y salida del filtro pasa bajas, graficada una década después de su frecuencia de corte.

Para esta última gráfica, se muestra como la señal de salida es prácticamente cero, esto lo podemos explicar porque la función de un filtro pasa bajas sólo hace pasar las frecuencias que están por encima y sobre la frecuencia de corte. Al graficar una década después de su frecuencia de corte, la señal se atenúa.

DIAGRAMA DE BODE

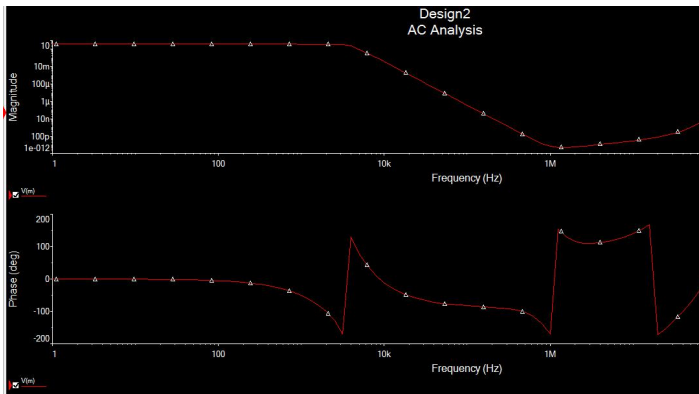


Fig. 11 Diagrama de Bode para “Filtro 2”

La “Fig. 11” muestra el análisis en AC del filtro de quinto orden, este a comparación de filtros de orden menor, la pendiente de la caída del voltaje después de su frecuencia de corte, es poco menor. Lo que significa que, si el filtro es de orden superior, la gráfica del diagrama de Bode se asemejara más a un filtro “ideal”.

IV. CONCLUSIÓN

Gracias a esta práctica logramos entender el funcionamiento correcto de un filtro de orden superior los cuales fueron de tercer y quinto orden, logramos un buen armado de los circuitos en el software multisim . logramos obtener buenos resultados en las salidas de cada circuito comparándolo con la regla de $\text{vin}(0.707)\text{av}$ donde correspondía a nuestros resultados.

Por otro lado, la normalización es un método bastante útil para la creación de un filtro de orden “n” a partir de la frecuencia pasante, frecuencia de supresión, atenuación pasante y atenuación de supresión, con esto se puede crear un filtro en este caso Butterworth de hasta décimo orden, como se explicó en el marco teórico, al tener un filtro de orden mayor, la pendiente de la banda de supresión es mayor, específicamente $20n \text{ db/década}$, aunque también se aumenta la complejidad del circuito.

VI. REFERENCIAS

- [1] Arthur Williamos, “Analog Filter and Circuit Design Handbook” 3er edition, McGraw Hill, 2014.
- [2] H. Voldman, “Analog Circuits and Design”, 2nd Edition, Newnes, 2011.

- [3] Rusty ALfred, “Digital Circuits for Everyone”, RW, 2000.
- [4] Karl Stephan, “Analog and Mixed-Signal Electronics”, 5th Edition, Wirley, 2015.