CAPÍTULO 3

FILTROS ACTIVOS

3.1 Filtros Activos.

Los filtros activos también tienen en sus configuraciones elementos pasivos como capacitores, resistencias y elementos activos como el Amplificador Operacional, por lo que estos circuitos presentan una etapa de amplificación.

Para estos filtros, H_0 es la ganancia como se mencionó en el capítulo 2, la cual varía dependiendo del tipo, si es pasa – bajas, pasa – altas o pasa – bandas.

Para el caso pasa – bajas, la función de transferencia se hace s = jω, donde ω = 0, se obtiene el valor $H_{0,}$ el cual es la magnitud deseada de la ganancia de cc.

En el caso pasa – altas, la función de transferencia, sustituimos s = jω, donde ω = α, se obtiene el valor de $H_{0.}$

Para el caso pasa – bandas, la forma estándar de todas las funciones pasa banda de segundo orden es H (jω) = H_{0BP} H_{BP} (jω), donde H_{0BP} se llama ganancia en resonancia, y

$$H_{BP} = \frac{\dfrac{\left(\dfrac{j\omega}{\omega_n}\right)}{Q}}{1 - \left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \dfrac{\left(\dfrac{j\omega}{\omega_n}\right)}{Q}}$$

(Se observa que la Q en el numerador es parte de la definición). Además del par de polos, esta función tiene un cero en el origen. Para construir la gráfica de magnitud se usan aproximaciones asintóticas. [1]

Por último, se hace que $\omega = \omega_n$ en la función de transferencia de cada filtro para obtener el valor de H_0.

3.1.1 Ventajas y Desventajas de los Filtros Activos

Una de las principales ventajas que tienen los filtros activos es que no tienen inductores en su configuración por lo que sus cálculos matemáticos son mucho más fáciles de realizar.

- Tienen muy buena ganancia e impedancia
- Su diseño es muy sencillo para implementar varios polos, por lo que son etapas de 2 polos conectados en cascada
- Debido a su diseño, su costo es bajo ya que no se implementan varios elementos pasivos como capacitores y resistencias.

Los filtros activos presentan alta sensitividad

- A diferencia de los filtros pasivos, presentan mucho ruido.
- Debido al amplificador operacional, tienen una limitación en alta frecuencia, por lo que su ancho de banda es limitado

3.2 Filtro Sallen Key

Una manera alterna de realizar un filtro, es usar un filtro activo, el cual está diseñado por medio de capacitores, resistencias y amplificadores operacionales. La realización activa más usada es Sallen Key.

3.2.1 Filtro Pasa Bajas

A continuación se muestra el análisis del diseño pasa bajas del filtro sallen key.

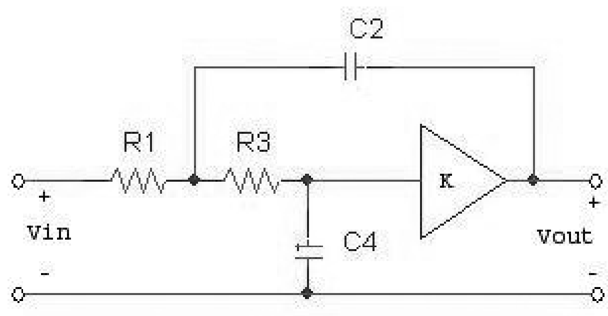

Figura 3.1 Filtro Sallen Key Pasa Bajas

La función de transferencia queda de la siguiente manera para el filtro pasa bajas

$$\frac{V_{sal}(s)}{V_{ent}(s)} = \frac{\dfrac{K}{R_1R_3C_2C_4}}{s^2 + s\left(\dfrac{1}{R_3C_4} + \dfrac{1}{R_1C_2} + \dfrac{1}{R_3C_2} - \dfrac{K}{R_3C_4}\right) + \dfrac{1}{R_1R_3C_2C_4}} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Como vimos en el capítulo 2 la función de transferencia se puede cambiar como la ecuación 2.37 como se muestra en la siguiente ecuación

$$N(s) = \frac{H_0 \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2}$$

Para hacer el análisis de este filtro pasa bajas, emplearemos tres diseños.

Diseño 1

Este diseño consiste en obtener ω_n y Q de nuestros polos y k = 1

$$\omega_n = \sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2} \qquad \textbf{(3.2)}$$

$$Q = \frac{\omega_n}{2 | \sigma_k |} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Donde σ_k es la parte real del polo y ω_k es la parte imaginaria del polo.

$$n = \frac{R_3}{R_1} \qquad m = \frac{C_4}{C_2} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Se selecciona un valor para R y C

$$R_1 = R \qquad C_2 = C \qquad \textbf{(3.5)}$$

Por lo que la función de transferencia queda de la siguiente manera

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{\frac{1}{mnR^2C^2}}{s^2 + \left(\frac{1}{RC} - \frac{n+1}{n}\right)s + \frac{1}{mnR^2C^2}} \qquad \textbf{(3.6)}$$

De donde se obtiene

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{mn}RC} \quad \textbf{(3.7)}$$

$$\frac{1}{Q} = (n+1)\sqrt{\frac{m}{n}} \quad \textbf{(3.8)}$$

De la ecuación 3.6 y 3.7 se deben escoger valores de tal manera que los valores de las resistencias y capacitores no se produzcan en un rango muy amplio de valores.

n se obtiene despejando de la ecuación 3.7

$$n = \left(\frac{1}{2mQ^2} - 1\right) \pm \frac{\sqrt{1-4mQ^2}}{2mQ^2} \quad \textbf{(3.9)}$$

Para que n sea un valor real, m tiene que satisfacer la siguiente ecuación

$$m \leq \frac{1}{4Q^2} \quad \textbf{(3.10)}$$

$$R = \frac{1}{\sqrt{mn}\omega_n C} \quad \textbf{(3.11)}$$

Diseño 2

Este diseño es muy sencillo, ya que el amplificador de voltaje, k = 2. Este diseño consiste en dar un valor de C por lo que

$$C_2 = C_4 = C \quad \textbf{(3.12)}$$

Se siguen ocupando las ecuaciones 3.1 y 3.2

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_n C} \qquad \textbf{(3.13)}$$

$$R_3 = \frac{1}{R_1 \omega_n^2 C^2} \qquad \text{Ó} \qquad R_3 = \frac{R_1}{Q^2} \qquad \textbf{(3.14)}$$

Diseño 3

Al igual que el diseño 2, es muy fácil de hacer su análisis. Se selecciona un valor de C al igual que la ecuación 3.11.

Se obtiene R

$$R = \frac{1}{C\omega_n} \qquad \textbf{(3.15)}$$

Por lo que $R_3 = R_4 = R$

$$K = 3 - \frac{1}{Q} \qquad \textbf{(3.16)}$$

3.2.2 Filtro Pasa Altas

Para el filtro pasa altas se hace una transformación RC:CR, el cual se obtiene el circuito de la siguiente figura.

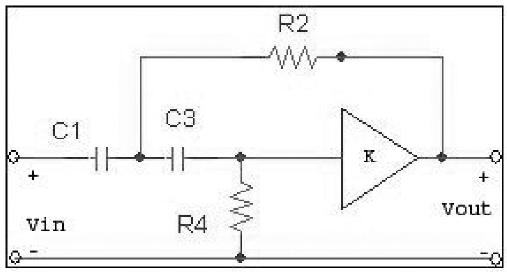

Figura 3.2 Filtro Sallen Key Pasa Altas

Al igual que en el filtro pasa bajas, se hacen tres diseños. Se ocupan las ecuaciones 3.1 y 3.2, para el caso de los tres diseños.

La función de transferencia del filtro pasa altas sallen key es la siguiente, la cual se iguala con la ecuación 3.17, la cual es la ecuación de la fórmula general para un pasa altas, mencionado en el capítulo 2, en términos de ω_n y Q.

$$N(s) = \frac{s^2 K}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_4 C_3} + \frac{1}{R_4 C_1} - \frac{K}{R_2 C_1}\right) + \frac{1}{R_2 R_4 C_1 C_3}} \quad \textbf{(3.17a)}$$

$$N(s) = \frac{H_0 s^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} \quad \textbf{(3.17b)}$$

Diseño 1

En este diseño K = 1. El valor de m esta dado por $m = \frac{C_3}{C_1}$ y $n = 4Q^2$, se selecciona un valor de C, con lo que tenemos $C_1 = C_3 = C$

$$R = \frac{1}{\omega_n C \sqrt{n}} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Por lo que $R_2 = R$

$$R_4 = nR_2 \qquad \textbf{(3.19)}$$

Diseño 2

Para el diseño, se selecciona un valor K = 2 y un valor arbitrario para $C_1 = C_3 = C$

$$\omega_n = \frac{1}{C\sqrt{R_2 R_4}} \qquad \frac{\omega_n}{Q} = \frac{1}{C}\left(\frac{2}{R_4} - \frac{1}{R2}\right) \qquad \textbf{(3.20)}$$

De la ecuación 3.18 obtenemos R_2 y R_4

$$R_4 = \frac{4Q}{C\omega_n\left(1 + \sqrt{1 + 8Q^2}\right)} \qquad \textbf{(3.21)}$$

$$R_2 = \frac{1 + \sqrt{1 + 8Q^2}}{4C\omega_n Q} \qquad \textbf{(3.22)}$$

Diseño 3

Para el diseño 3, al igual que los diseños anteriores, se seleccionan valores iguales para los capacitancias y resistencias $C_1 = C_3 = C$ y $R_2 = R_4 = R$

$$\omega_n = \frac{1}{RC} \qquad \textbf{(3.23)}$$

De esta ecuación se despeja R, dando un valor arbitrario a C

$$\frac{1}{Q} = 3 - K \qquad \textbf{(3.24a)}$$

Aquí se despeja K

$$K = -\frac{1}{Q} + 3 \qquad \textbf{(3.24b)}$$

3.2.3 Filtro Pasa Banda

Al igual que los filtros pasa bajas y pasa altas, existe una configuración para el filtro sallen key pasa banda.

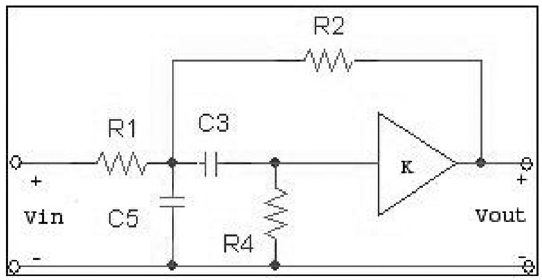

Figura 3.3 Filtro Sallen Key Pasa Banda.

La función de transferencia del filtro

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{\frac{sK}{R_1C_5}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1C_5} + \frac{1}{R_2C_5} + \frac{1}{R_4C_5} + \frac{1}{R_4C_3} - \frac{K}{R_2C_5}\right) + \frac{1}{R_4C_3C_5}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \tag{3.25a}$$

$$N(s) = \frac{H_0 \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} \tag{3.25b}$$

Diseño 1

En este diseño se considera las resistencias iguales y capacitores iguales, $R_1 = R_2 = R_4 = R$ y $C_3 = C_5 = C$

Para este diseño se consideran las siguientes ecuaciones

$$\omega_n = \frac{\sqrt{2}}{RC} \qquad \textbf{(3.26)}$$

Se despeja R

$$R = \frac{\sqrt{2}}{C\omega_n} \qquad \textbf{(3.26a)}$$

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{4-K} \qquad \textbf{(3.27)}$$

Se despeja K

$$K = 4 - \frac{\sqrt{2}}{Q} \qquad \textbf{(3.27b)}$$

$$H_0 = \frac{K}{4-K} \qquad \textbf{(3.28)}$$

Diseño 2

Para este diseño se selecciona un valor de K = 2, como se realizó en el diseño 2 del filtro pasa bajas, por lo que es un valor de gran estabilidad y fácil de obtener.

Se selecciona $R_1 = 1$ y $C_3 = C_5 = 1$

$$R_4 = \frac{1}{2\omega_n^2}\left(2 - \frac{\omega_n}{Q}\right) + \frac{1}{2\omega_n^2}\sqrt{\left(2 - \frac{\omega_n}{Q}\right)^2 + 8\omega_n^2} \qquad \textbf{(3.29)}$$

$$R_2 = \frac{1}{\omega_n^2 R_4 - 1} \qquad \textbf{(3.30)}$$

3.3 Filtro de Retroalimentación Múltiple

Esta configuración se llama de retroalimentación múltiple debido a que existen dos trayectorias de retroalimentación, a través de R_2 y C_6 como se muestra en la siguiente figura.

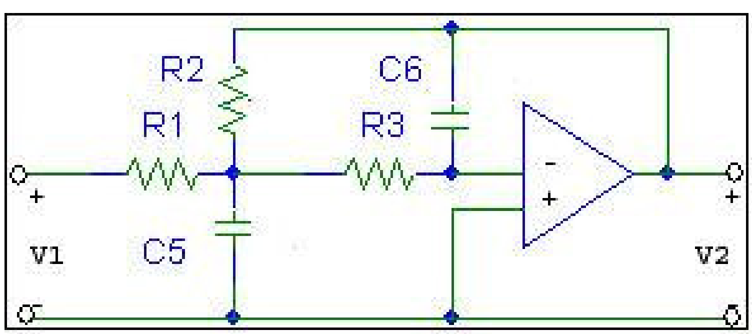

Figura 3.4 Filtro pasa bajas de retroalimentación múltiple

3.3.1 Filtro Pasa Bajas

En la figura 3.4 se muestra el diagrama del circuito pasa bajas, es un filtro con ganancia alta. A continuación se muestra su función de transferencia.

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{-\frac{1}{R_1 R_3 C_5 C_6}}{s^2 + s\frac{1}{C_5}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\right)+\frac{1}{R_2 R_3 C_5 C_6}} \quad \textbf{(3.31)}$$

Seleccionamos un valor de C, de lo cual obtenemos $C_5 = C$

$$C_6 = mC \quad \textbf{(3.32)}$$

El método de diseño consiste en seleccionar un valor de H_0, puesto que la configuración es inversora, H_0 es negativo.

$$H_0 = -\frac{R_2}{R_1} \quad \textbf{(3.33)}$$

La obtención del valor de $H_{0,}$ se menciona al principio de éste capítulo.

$$m = \frac{1}{4Q^2(1+|H_0|)} \quad \textbf{(3.34)}$$

$$R_2 = \frac{1}{2\omega_n CmQ}\left[1 \pm \sqrt{1-4Q^2(1+|H_0|)}\right] \quad \textbf{(3.35)}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{|H_0|} \tag{3.36}$$

$$R_3 = \frac{1}{\omega_n^2 C^2 R_2 m} \tag{3.37}$$

3.3.2 Filtro Pasa Altas

En este filtro también se puede aplicar la transformación RC – CR para obtener el filtro pasa altas como se muestra en la siguiente figura, en el que también es un filtro con ganancia mayor.

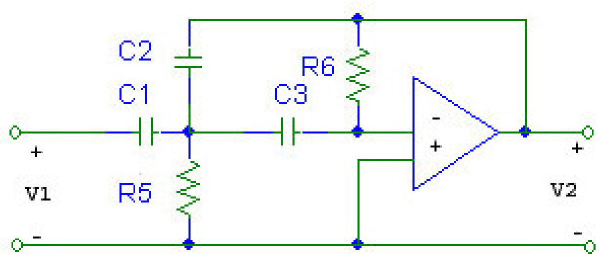

Figura 3.5 Filtro pasa altas de retroalimentación múltiple

Su función de transferencia es la siguiente

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{-s^2 \frac{C_1}{C_2}}{s^2 + s\frac{1}{R_6}\left(\frac{C_1}{C_2C_3} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right) + \frac{1}{R_5R_6C_2C_3}} \tag{3.38}$$

Al igual que en el filtro pasa bajas, se da un valor comercial a C por lo que tenemos $C_1 = C_3 = C$. En el método de diseño se escoge un valor de H_0.

$$H_0 = -\frac{C_1}{C_2} \tag{3.39}$$

$$R_5 = \frac{|H_0|}{\omega_n QC(2|H_0|+1)} \tag{3.40}$$

$$R_6 = \frac{(2|H_0|+1)Q}{\omega_n C} \tag{3.41}$$

$$C_2 = \frac{C}{|H_0|} \tag{3.42}$$

3.3.3 Filtro Pasa Banda

También existe una configuración para el filtro pasa banda de retroalimentación múltiple como se muestra en la figura 3.6.

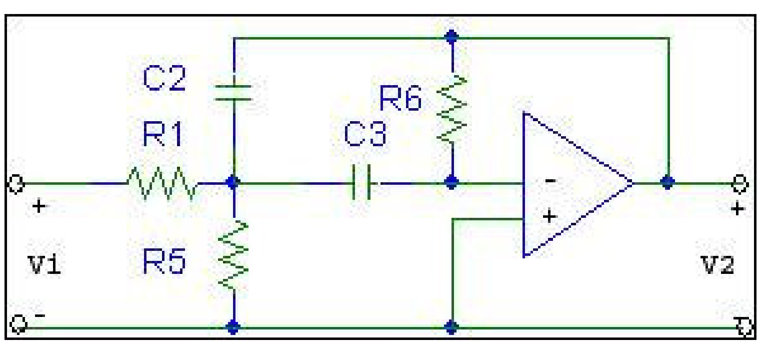

Figura 3.6 Filtro pasa banda de retroalimentación múltiple

Su función de transferencia es:

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{-\frac{s}{R_1C_2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_6C_3} + \frac{1}{R_6C_2}\right) + \frac{1}{R_6C_2C_3}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_5}\right)} \quad \textbf{(3.43a)}$$

Se seleccionan capacitores iguales, $C_2 = C_3 = C$.

El método de diseño, al igual que en los otros casos, se selecciona un valor para H_0, por lo que $|H_0| < 2Q^2$.

Como se vio en el capítulo 2, en la ecuación 2.37, obtenemos los valores de ω_n y Q, los cuales se obtienen igualando la función de transferencia del filtro de retroalimentación múltiple con la función de transferencia general.

$$\omega_n = \frac{\sqrt{1 + \frac{R_5}{R_1}}}{\sqrt{R_5R_6C_2C_3}} \quad \textbf{(3.44a)}$$

$$Q = \frac{\sqrt{1 + \frac{R_5}{R_1}}}{\sqrt{\frac{R_5C_2}{R_6C_3}} + \sqrt{\frac{R_5C_3}{R_6C_2}}} \quad \textbf{(3.44b)}$$

Se escoge un valor de H_0, el cual está dado por la siguiente ecuación, siguiendo el procedimiento mencionado al principio de éste capítulo.

$$H_0 = \frac{\frac{R_6}{R_1}}{1 + \frac{C_2}{C_3}} \quad \textbf{(3.45)}$$

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_n C \mid H_0 \mid} \quad \textbf{(3.46)}$$

$$R_5 = \frac{Q}{\left(2Q^2 - \mid H_0 \mid\right)\omega_n} \quad \textbf{(3.47)}$$

Para que R_5 sea positiva $\mid H_0 \mid < 2Q^2$

$$R_6 = \frac{2Q}{\omega_n C} \quad \textbf{(3.48)}$$

3.4 Filtro Tow Thomas

Hasta ahora sólo hemos visto circuitos activos con un solo amplificador, debido a que el costo de los circuitos activos es muy barato se han empleado circuitos con más de un amplificador, como es el caso del filtro Tow Thomas que utiliza tres amplificadores operacionales,.

Este filtro también usa variables de estado para su síntesis y el nombre se debe a sus dos inventores, James Tow y Joe Thomas. En la siguiente figura se muestra como se pueden realizar simultáneamente funciones pasa bajas y pasa banda.[2]

A diferencia de otros filtros de variables de estado, el filtro Tow Thomas tiene la entrada no inversora del amplificador conectada a tierra, la sensitividad es muy baja, debido a esto, el filtro es adecuado para realizar filtros con valores altos de Q

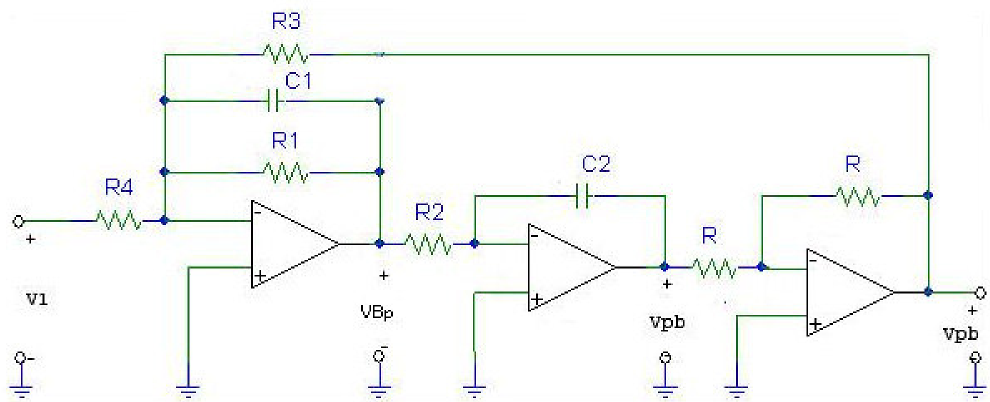

Figura 3.7 Filtro de variable de estado Tow Thomas

3.4.1 Filtro Pasa Bajas

La función de transferencia es

$$\frac{V_{pb}(s)}{V_1(s)} = \frac{-\dfrac{1}{R_2 R_4 C_1 C_2}}{s^2 + s\dfrac{1}{R_1 C_1} + \dfrac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}} \tag{3.49}$$

$$H_0 = \frac{R_1}{R_4} \tag{3.50}$$

$$R_2 = R_3 = R \tag{3.51a}$$

$$C_1 = C_2 = C \tag{3.51b}$$

$$R = \frac{1}{\omega_n C} \quad \textbf{(3.52a)}$$

$$R_1 = QR \quad \textbf{(3.52b)}$$

$$R_4 = \frac{R}{H_0} \quad \textbf{(3.53)}$$

3.4.2 Filtro Pasa Altas

A diferencia de los filtros pasa bajas y pasa banda ocupamos el diseño Tow Thomas bicuadrático para el caso del filtro pasa altas. En la figura 3.8 se muestra el filtro Tow Thomas pasa altas.

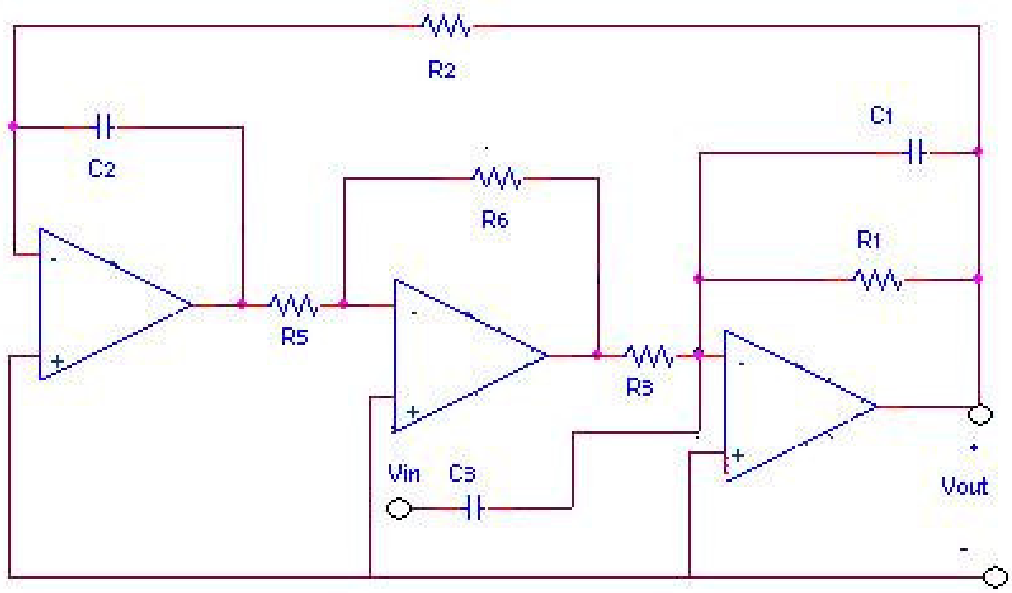

Figura 3.8a Filtro Pasa Altas Tow Thomas Bicuadrático.

El método consiste en hacer $R_3 = R_5 = R_6 = 1\Omega$ y $C_1 = C_2 = C_3 = 1$F. La función de transferencia para la función pasa altas es:

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = -C_3 \frac{s^2}{s^2 + s\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \qquad \textbf{(3.54)}$$

$$Q_p = \frac{R_1}{\sqrt{R_2}} \qquad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_2}} \qquad |H_0| = C_3 \qquad \textbf{(3.55)}$$

La función de transferencia para el filtro bicuadrático Tow Thomas es la siguiente

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = -\frac{s^2 + \frac{1}{R_7}}{s^2 + s\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \qquad \textbf{(3.56a)}$$

Las ecuaciones de diseño son las siguientes, seguimos haciendo $R_3 = R_5 = R_6 = 1$ y $C_1 = C_2 = C_3 = 1$

$$Q_p = \frac{R_1}{\sqrt{R_2}} \qquad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{R_2}} \qquad \omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_7}} \qquad |H_0| = 1 \qquad \textbf{(3.56b)}$$

En la figura 3.8b se muestra la configuración del filtro Tow Thomas Bicuadrático.

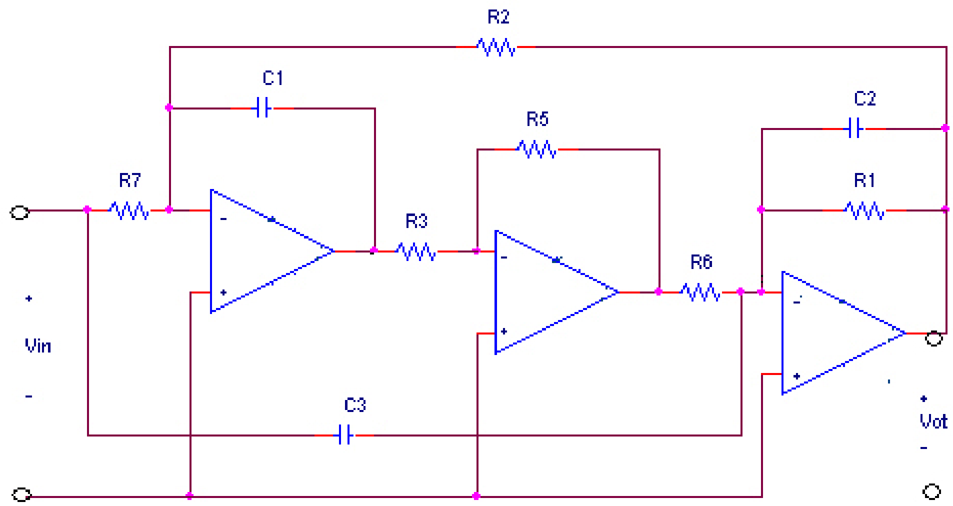

Figura 3.8b Filtro Bicuadrático

3.4.3 Filtro Pasa Banda

La configuración para este filtro es igual al filtro pasa bajas, por lo tanto tienen las mismas características y su función de transferencia es

$$\frac{V_{pB}(s)}{V_1(s)} = \frac{-\dfrac{s}{R_4 C_1}}{s^2 + s\dfrac{1}{R_1 C_1} + \dfrac{1}{R_3 R_2 C_1 C_2}} \tag{3.57}$$

$$H_0 = -\frac{R_3}{R_4} \tag{3.58}$$

El método de diseño es igual al filtro pasa bajas excepto R_4 se calcula de la siguiente manera

$$R_4 = \frac{R_1}{H_0} \tag{3.59}$$

3.5 Filtro KHN

Este filtro fue el primero en tener tres amplificadores operacionales, al igual que el filtro Tow Thomas es un filtro de variable de estado y es capaz de realizar funciones pasa bajas, pasa altas y pasa bandas en una misma configuración, como se muestra en la siguiente figura.

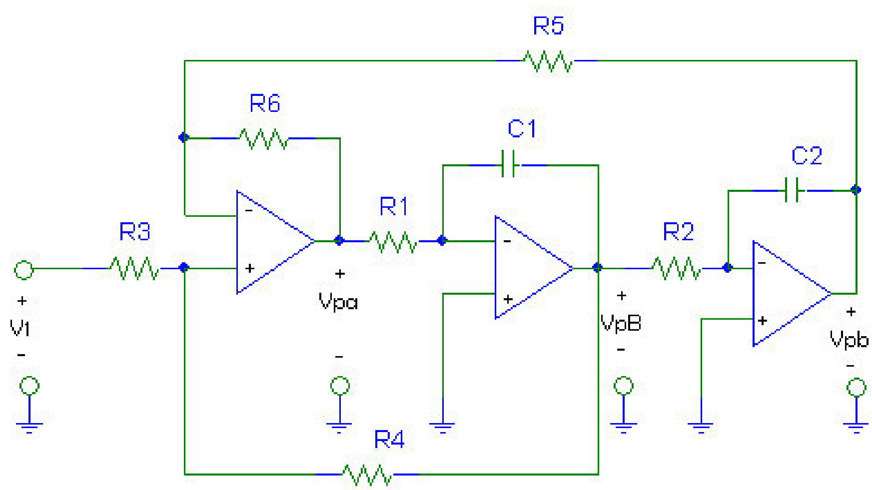

Figura 3.9a Filtro de Variable de Estado KHN.

3.5.1 Filtro Pasa Bajas

A diferencia del filtro Tow Thomas, en la entrada del primer amplificador operacional no inversora, no esta conectada a tierra, eso hace que sea una desventaja, tiene sensitividades muy bajas con valores muy altos de Q. Su función de transferencia es:

$$\frac{V_{pb}(s)}{V_1(s)} = \frac{\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_3}{R_4}}\dfrac{1}{R_1C_1}}{s^2 + \dfrac{s}{R_1C_1}\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_4}{R_3}} + \dfrac{\dfrac{R_6}{R_5}}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad \textbf{(3.60)}$$

El método de diseño para este filtro es el siguiente

Se dan valores a R_3 y C

$$R_3 = R_5 = R_6 \qquad \textbf{(3.61)}$$

$$C_1 = C_2 = C \qquad \textbf{(3.62)}$$

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{\omega_n C} \qquad \textbf{(3.63)}$$

$$R_4 = (2Q-1)R_3 \qquad \textbf{(3.64)}$$

$$H_0 = \frac{(2Q-1)}{Q} \qquad \textbf{(3.65)}$$

3.5.2 Filtro Pasa Altas y Filtro Pasa Banda

La configuración de los filtro pasa altas y pasa bandas es la misma que el filtro pasa bajas, el método de diseño es el mismo, Para el caso de H_0 es igual a la ecuación 3.64. Su función de transferencia es la siguiente del filtro pasa altas

$$\frac{V_{pa}(s)}{V_1(s)} = \frac{\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_3}{R_4}}s^2}{s^2 + \dfrac{s}{R_1C_1}\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_4}{R_3}} + \dfrac{\dfrac{R_6}{R_5}}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad \textbf{(3.66)}$$

La función de transferencia para el filtro pasa banda es

$$\frac{V_{pB}(s)}{V_1(s)} = \frac{-\left[\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_3}{R_4}}\dfrac{s}{R_1C_1}\right]}{s^2 + \dfrac{s}{R_1C_1}\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_4}{R_3}} + \dfrac{\dfrac{R_6}{R_5}}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad \textbf{(3.67a)}$$

Para el caso del filtro pasa bandas

$$H_0 = (1 - 2Q) \quad \textbf{(3.67b)}$$

3.5.3 Filtro KHN Bicuadrático

El filtro KHN se puede hacer bicuadrático sumando y restando las tres salidas que este filtro nos proporciona. El filtro KHN bicuadrático consiste en dar valores a algunas resistencias. Por ejemplo se hace $R_3 = R_5 = R_8 = R_9 = 1$ y $R_1 C_1 = R_2 C_2 = 1$, con lo que la función de transferencia es: [2]

$$\frac{V_{sal}(s)}{V_{ent}(s)} = \frac{\frac{1+R_{10}}{1+R_7} s^2 + \left[\frac{1+R_7}{1+R_{10}} s\right] + R_7}{\frac{1+R_4}{1+R_6} s^2 + s\frac{1+R_6}{1+R_4} + R_6} \quad \textbf{(3.68)}$$

Por lo que se obtienen las siguientes ecuaciones de diseño para este filtro

$$\omega_z = \sqrt{R_7}\,, \qquad \omega_p = \sqrt{R_6} \quad \textbf{(3.69a)}$$

$$Q_z = \frac{1+R_{10}}{1+R_7}\sqrt{R_7}\,, \qquad Q_p = \frac{1+R_4}{1+R_6}\sqrt{R_6} \quad \textbf{(3.69b)}$$

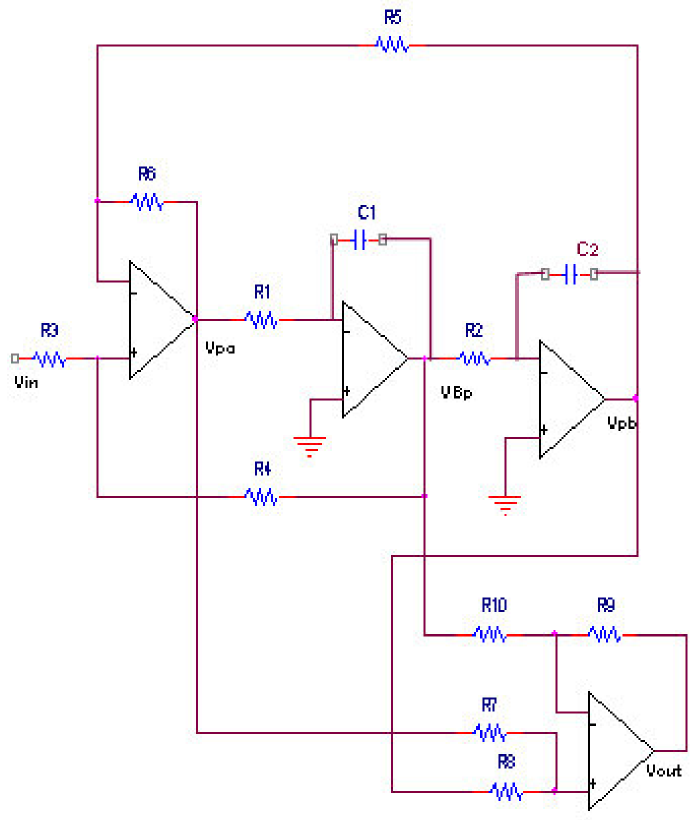

Figura 3.9b Filtro KHN Bicuadrático

3.6 Filtro Universal

El filtro de variable de estado KHN tiene una limitación al no poder realizar la función pasa banda no inversora mientras que las funciones pasa bajas y pasa altas sólo se pueden realizar como no inversoras. Afortunadamente es posible modificar el filtro KHN para superar esta limitación. El circuito resultante se conoce como filtro activo universal. La modificación consiste en aplicar la señal de entrada también a través de la entrada inversora del amplificador operacional sumador del filtro KHN.[2]

3.6.1 Filtro Pasa Bajas, Pasa Altas y Pasa Banda

Para el diseño de las tres realizaciones es el mismo como se muestra en la siguiente figura.

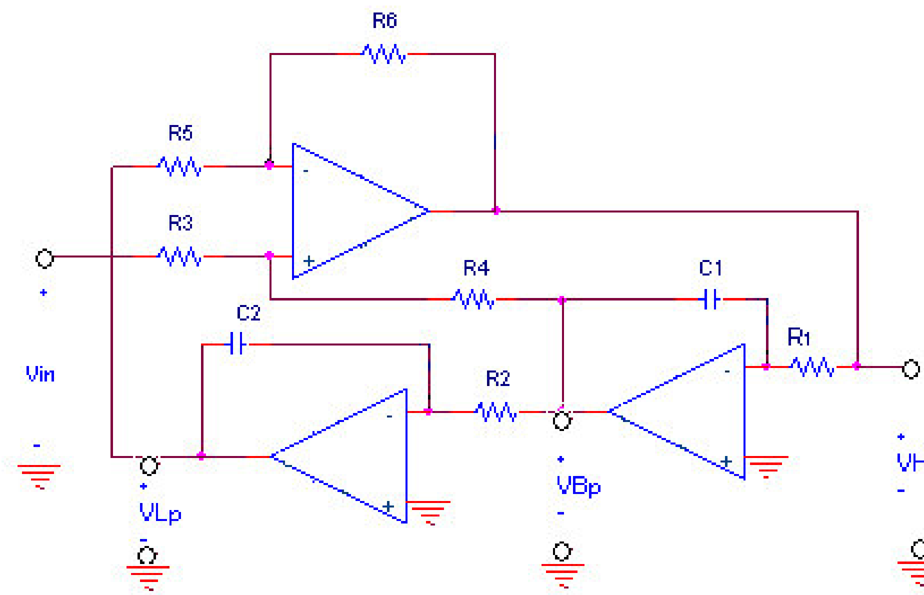

Figura 3.10a Filtro Activo Universal

$$\frac{V_{pb}(s)}{V_1(s)} = \frac{\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_3}{R_4}} \dfrac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \dfrac{s}{R_1 C_1} \dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_4}{R_3}} + \dfrac{\dfrac{R_6}{R_5}}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \qquad \textbf{(3.70a)}$$

$$\frac{V_{pa}(s)}{V_1(s)} = \frac{\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_3}{R_4}} s^2}{s^2 + \dfrac{s}{R_1 C_1} \dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_4}{R_3}} + \dfrac{\dfrac{R_6}{R_5}}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \qquad \textbf{(3.70b)}$$

$$\frac{V_{Pb}(s)}{V_1(s)} = \frac{-\dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_3}{R_4}} \dfrac{s}{R_1 C_1}}{s^2 + \dfrac{s}{R_1 C_1} \dfrac{1+\dfrac{R_6}{R_5}}{1+\dfrac{R_4}{R_3}} + \dfrac{\dfrac{R_6}{R_5}}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \qquad \textbf{(3.70c)}$$

El procedimiento es relativamente muy sencillo

1. Se obtiene Q y ω_n.
2. Se elige un valor para $C_1 = C_2 = C$, por lo regular se elige 1.
3. Se calcula $R_1 = R_2 = \dfrac{1}{\omega_n C}$ **(3.71a)**
4. Se selecciona un valor para $R_3 = R_5 = R_6$, a lo igual que las capacitancias se seleccionan un valor igual a 1.
5. Se calcula $R_4 = (2Q-1)R_3$ **(3.71b)**

Para encontrar los valores de H_0, se aplica el siguiente procedimiento:

* Para el caso pasa bajas y pasa altas: $H_0 = \dfrac{2Q-1}{Q}$ **(3.72a)**

* Para pasa banda: $H_0 = 2Q-1$ **(3.72b)**

3.6.2 Filtro Universal de Ganancia Unitaria

Los diseños con etapas bicuadráticas también se pueden abordar partiendo de una estructura normalizada en frecuencias, como se muestra en la figura 3.10b. Se trata de un filtro normalizado en la frecuencia central, el cual su método de diseño se muestra a continuación.

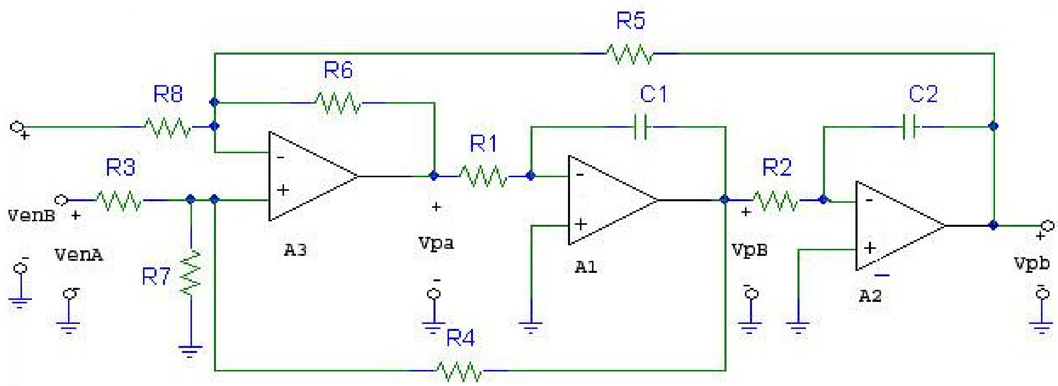

Figura 3.10b Filtro Activo Universal de Ganancia Unitaria

Las funciones de transferencia para los distintos casos son las siguientes:

$$\frac{V_{pa}(s)}{V_1(s)} = \frac{-\frac{R_6}{R_8}s^2}{s^2 + \frac{s}{R_1C_1}\frac{1+\frac{R_6}{R_5}+\frac{R_6}{R_8}}{1+\frac{R_4}{R_3}+\frac{R_4}{R_7}} + \frac{\frac{R_6}{R_5}}{R_1R_2C_1C_2}} \tag{3.73a}$$

$$\frac{V_{pb}(s)}{V_1(s)} = \frac{-\frac{R_6}{R_8}\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{s^2 + \frac{s}{R_1C_1}\frac{1+\frac{R_6}{R_5}+\frac{R_6}{R_8}}{1+\frac{R_4}{R_3}+\frac{R_4}{R_7}} + \frac{\frac{R_6}{R_5}}{R_1R_2C_1C_2}} \quad \textbf{(3.73b)}$$

$$\frac{V_{pB}(s)}{V_1(s)} = \frac{\frac{R_6}{R_8}\frac{1}{R_1C_1}s}{s^2 + \frac{s}{R_1C_1}\frac{1+\frac{R_6}{R_5}+\frac{R_6}{R_8}}{1+\frac{R_4}{R_3}+\frac{R_4}{R_7}} + \frac{\frac{R_6}{R_5}}{R_1R_2C_1C_2}} \quad \textbf{(3.73c)}$$

El método de diseño para los diferentes casos, se muestran en las siguientes fórmulas:

$$R_1 = R_2 = \frac{5.0329*10^4}{f_n}K\Omega \quad \textbf{(3.74a)}$$

$$R_4 = R_5 = 100K\Omega \quad \textbf{(3.74b)}$$

$$R_6 = 10K\Omega \quad \textbf{(3.74c)}$$

$$C_1 = C_2 = 1000pF \quad \textbf{(3.74d)}$$

Para el caso inversor ($V_{enA} = 0$) se ocupan las fórmulas 3.70 a 3.73 para todos los casos.

Para todos los casos $R_3 = \infty$.

Pasa Bajas:

$$R_8 = 100K\Omega \quad \textbf{(3.75a)}$$

$$R_7 = \frac{100}{3.7947Q - 1}K\Omega \quad \textbf{(3.75b)}$$

Pasa Altas:

$$R_8 = 10K\Omega \quad \textbf{(3.76a)}$$

$$R_7 = \frac{100}{6.6402Q - 1}K\Omega \quad \textbf{(3.76b)}$$

Pasa Banda

$$R_8 = 31.62QK\Omega \quad \textbf{(3.77a)}$$

$$R_7 = \frac{100}{3.4785Q}K\Omega \quad \textbf{(3.77b)}$$

3.7 Filtro Deliyannis Friend

Este tipo de topología fue propuesta por Deliyannis, ocupando la configuración de retroalimentación múltiple, ya que tiene dos trayectorias de retroalimentación negativa. Se hace una variación a la configuración de retroalimentación múltiple, el cual consiste en la introducción de retroalimentación positiva la cual se logra con un divisor de voltaje formado por dos resistencias R_A y R_B. [2]

Si deseamos modificar una estructura para que tenga ceros finitos debemos proveer trayectorias adicionales entre la entrada y la salida pero se tiene que tener cuidado de no modificar la realización de los polos. [2]

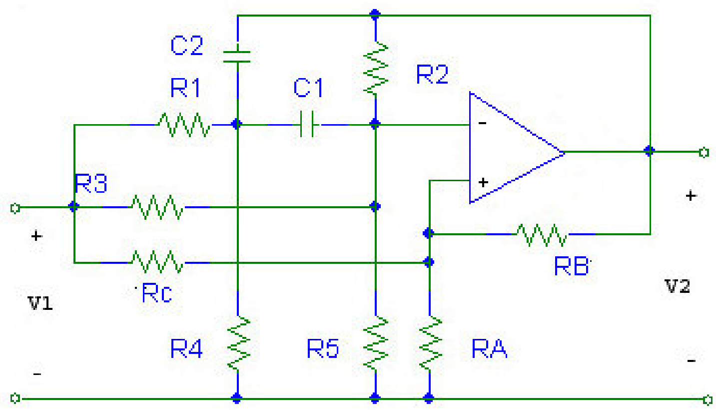

Figura 3.10 Filtro Deliyannis – Friend.

Al analizar el circuito se obtiene la siguiente función de transferencia: [2]

$$\frac{V_{sal}(s)}{V_{ent}(s)} = \frac{cs^2 + ds + e}{s^2 + as + b} \qquad \textbf{(3.78)}$$

Donde:

$$a = \frac{R_A R_C}{R_A + R_C}\left(\begin{array}{l} \dfrac{1}{C_1R_2R_C} + \dfrac{1}{C_1R_2R_A} + \dfrac{1}{C_2R_2R_C} + \dfrac{1}{C_2R_2R_A} - \dfrac{1}{C_1R_5R_B} - \dfrac{1}{C_1R_3R_B} - \dfrac{1}{C_2R_3R_B} \\ - \dfrac{1}{C_2R_5R_B} - \dfrac{1}{C_2R_4R_B} - \dfrac{1}{C_2R_1R_B} \end{array}\right)$$

$$b = \frac{1}{C_1 C_2} \frac{R_A R_C}{R_A + R_C} \left(\begin{array}{l} \frac{1}{R_2 R_4 R_C} + \frac{1}{R_2 R_4 R_A} + \frac{1}{R_1 R_2 R_C} + \frac{1}{R_1 R_2 R_A} - \frac{1}{R_3 R_4 R_B} - \frac{1}{R_1 R_5 R_B} \\ - \frac{1}{R_4 R_5 R_B} - \frac{1}{R_1 R_3 R_B} \end{array} \right)$$

$$c = \frac{R_A R_C}{R_A + R_C}$$

$$d = \frac{R_A R_C}{R_A + R_C} \left(\begin{array}{l} \frac{1}{C_1 R_2 R_C} + \frac{1}{C_1 R_2 R_C} + \frac{1}{C_1 R_5 R_C} + \frac{1}{C_2 R_5 R_C} + \frac{1}{C_2 R_4 R_C} - \frac{1}{C_2 R_3 R_A} - \frac{1}{C_1 R_3 R_B} \\ - \frac{1}{C_1 R_3 R_A} - \frac{1}{C_2 R_1 R_A} - \frac{1}{C_2 R_3 R_B} - \frac{1}{C_2 R_1 R_B} \end{array} \right)$$

$$e = \frac{1}{C_1 C_2} \frac{R_A R_C}{R_A + R_C} \left(\begin{array}{l} \frac{1}{R_4 R_5 R_C} + \frac{1}{R_2 R_4 R_C} + \frac{1}{R_1 R_5 R_C} + \frac{1}{R_1 R_2 R_C} - \frac{1}{R_3 R_4 R_B} - \frac{1}{R_1 R_3 R_B} \\ - \frac{1}{R_3 R_4 R_A} - \frac{1}{R_1 R_3 R_A} \end{array} \right)$$

Método de diseño para el filtro Deliyannis Friend

1. Se seleccionan los capacitores normalizados.

$$C_1 = C_2 = 1F$$

2. Se selecciona para el coeficiente de retroalimentación positiva K un valor inicia, por ejemplo K = 0.1

3. Para amplificar los cálculos de futuros pasos se definen dos constantes x_1 y x_2

$$x_1 = \frac{2K}{-a+\sqrt{a^2+8Kb}} \qquad x_2 = \frac{c+2ex_1^2-dx_1}{1+K}$$

Si el valor de x_2 es mayor o igual a la unidad se reducen los coeficientes del numerador hasta que se tenga $x_2 < 1$.

4. Se selecciona $R_B = 1\Omega$

5. Se seleccionan los valores de R_A y R_C

$$R_A = \frac{K}{1-c} \qquad R_C = \frac{K}{c}$$

Se requiere c < 1

6. Se calcula R_1 y R_4

$$R_1 = \frac{x_1}{x_2} \qquad R_4 = \frac{R_1 x_1}{R_1 - x_1} = \frac{x_1}{1-x_2}$$

Para evitar un valor negativo de R_4, si el valor calculado de x_2 es mayor que 1, se deberán reducir los valores de los coeficientes c, d y e.

7. Nuevamente para reducir los cálculos posteriores definimos dos constantes y_1 y y_2. La constante y_1 debe satisfacer $0 \le y_1 \le 1$ y la constante y_2 debe ser no negativa y está definida por

$$y_2 = \frac{(1+k)(c-y1)}{x_1 b\left(\frac{e}{b} - c\right)} > 0$$

8. Se obtienen las resistencias R_2, R_3 y R_5.

$$R_2 = \frac{y_2}{x_1 y_2 b + K} \qquad R_3 = \frac{y_2}{y_1} \qquad R_5 = \frac{y_2}{1 - \frac{y_2}{R_3}}$$