

## 0.1. Celda universal

Las celdas universales es un conjunto de filtros RC activos de segundo orden, compuestos por amplificadores operacionales configurados de forma sumadora, restadora, integradora, amplificadora o atenuadora, puestos en cascada. Estas son también conocidas como celdas de variables de estado, debido al uso de dicho método para la resolución de las ecuaciones diferenciales. Este tipo de celdas se caracteriza por poseer bajas sensibilidades con respecto a sus componentes, alta flexibilidad y buen rendimiento. Existen distintos tipos de configuraciones, donde cada una de estas posee sus respectivas ventajas y desventajas. A continuación, se procede a analizar cada una de ellas<sup>1</sup>.

### 0.1.1. Kerwin-Huelsman-Newcomb (KHN)

La celda Kerwin-Huelsman-Newcomb, nombre otorgado a partir de sus creadores<sup>2</sup>, puede ser comprendida con mayor facilidad a partir de un ejemplo. Se considera una transferencia de un filtro pasa banda:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{Ks}{s^2 + a_1s + a_0} \quad (1)$$

Se divide, tanto el numerador como el denominador de la expresión de la izquierda, por  $s^2$ .

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{K}{s}}{1 + \frac{a_1}{s} + \frac{a_0}{s^2}} \quad (2)$$

Se define

$$V_a(s) = \frac{V_i(s)}{1 + \frac{a_1}{s} + \frac{a_0}{s^2}} \quad (3)$$

Reescribiendo (2) con (3), se obtiene

$$V_o(s) = \frac{K}{s} \cdot V_a(s) \quad (4)$$

Si se utiliza la transformada de Laplace inversa tanto en (3) como en (4), se observa que se posee

$$\begin{aligned} v_a(t) &= v_i(t) - a_1 \int v_a(t) dt - a_0 \int \left( \int v_a(t) dt \right) dt \\ v_o(t) &= K \int \left( \int v_a(t) dt \right) dt \end{aligned} \quad (5)$$

Del sistema anterior,  $v_a(t) = \ddot{x}(t)$ ,  $\int v_a(t) dt = \dot{x}(t)$  y  $\int \left( \int v_a(t) dt \right) dt = x(t)$  son las llamadas variables de estado. Es más fácil de interpretar estas observando la Figura (1).

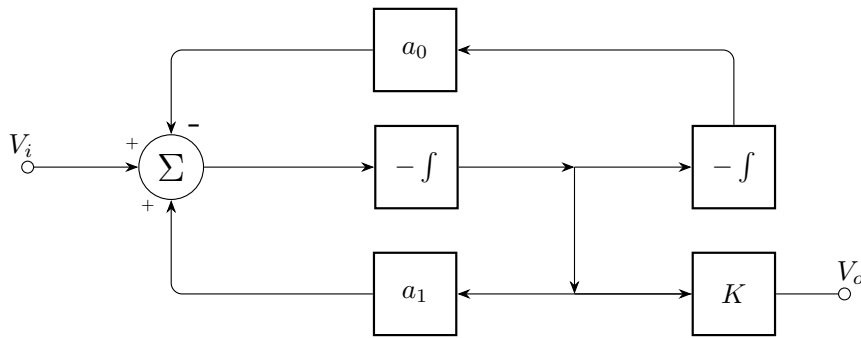


Figura 1: Diagrama de bloques de la celda KHN.

Es así que, para cada integrador se obtiene  $V_{o3} = \frac{-V_{o2}}{sR_2C_2}$  y  $V_{o2} = \frac{-V_{o1}}{sR_1C_1}$ , mientras que para el sumador

$$V_{o1} = -\frac{R_6}{R_5} V_{o3} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_5 + R_6}{R_5} V_1 + \frac{R_3}{R_3 + R_4} \frac{R_5 + R_6}{R_5} V_{o2}$$

<sup>1</sup>L. Huelsman, Active and passive analog filter design, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

<sup>2</sup>W. J. Kerwin, L. P. Huelsman, and R. W. Newcomb, "State-Variable Synthesis for Insensitive Integrated Circuit Transfer Functions," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 2, no. 3, pp. 87–92, Sep. 1967.

Finalmente, con las definiciones previas se puede elaborar el circuito presentado a continuación:

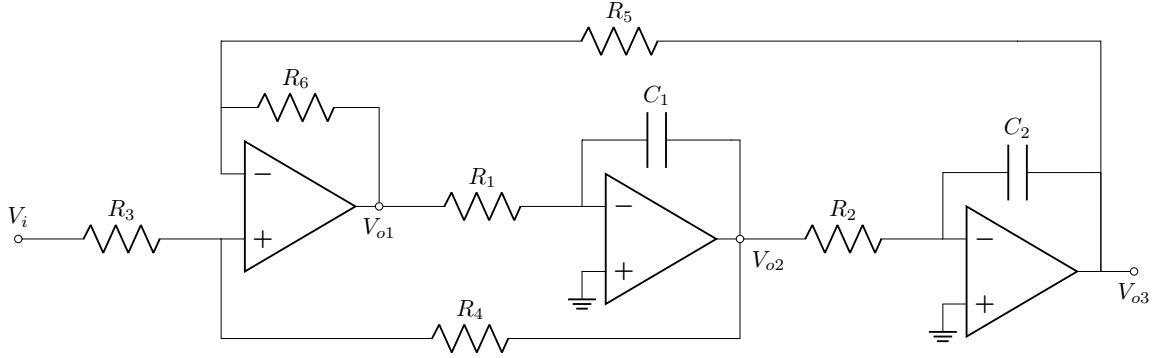


Figura 2: Celda KHN.

Con todo lo establecido previamente se consigue determinar las siguientes transferencias:

$$\frac{V_{o3}}{V_i} = \frac{R_5 + R_6}{R_4 + R_3} \frac{R_3}{R_5} \frac{1}{D(s)} \quad (6)$$

$$\frac{V_{o2}}{V_i} = -\frac{R_5 + R_6}{R_4 + R_3} \frac{R_3}{R_5} \frac{s}{R_1 C_1 D(s)} \quad (7)$$

$$\frac{V_{o1}}{V_i} = \frac{R_5 + R_6}{R_4 + R_3} \frac{R_3}{R_5} \frac{s^2}{D(s)} \quad (8)$$

Siendo

$$D(s) = s^2 + \frac{s}{R_1 C_1} \frac{R_5 + R_6}{R_4 + R_3} \frac{R_3}{R_5} + \frac{R_6}{R_1 R_2 R_5 C_1 C_2}$$

Observando (6), (7) y (8), se denota tomando cada una de dichas salidas, esta celda puede ser utilizada como un pasa bajos, pasa banda y pasa altos respectivamente. Es por ello que a partir de ahora se considera  $V_{PA} = V_{o1}$ ,  $V_{BP} = V_{o2}$  y  $V_{PB} = V_{o3}$ . Tanto la frecuencia de corte, como el factor  $Q$  de cada etapa, es el mismo, ya que comparten denominador, siendo estos

$$\omega_o = \sqrt{\frac{R_6}{R_1 R_2 R_5 C_1 C_2}} \quad (9)$$

$$Q = \frac{R_3 + R_4}{R_5 + R_6} \frac{R_5}{R_3} \sqrt{\frac{R_1 R_6 C_1}{R_2 R_5 C_2}}$$

Es destacable la independencia que posee  $\omega_o$  de  $R_3$  y  $R_4$ , ya que es posible modificar el factor  $Q$  son modificar la frecuencia de corte. Además, el termino  $K$  previamente establecido, varía para cada salida.  $K(PB)$  representa la ganancia en continua para el pasa bajos,  $K(BP)$  la ganancia en la frecuencia de resonancia del pasa banda y para el pasa altos,  $K(PA)$  es la ganancia en frecuencia infinita.

$$K(PB) = \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} \frac{R_4}{R_6} \quad \text{con } \omega = 0$$

$$K(BP) = -\frac{R_4}{R_3} \quad \text{con } \omega = \omega_o \quad (10)$$

$$K(PA) = \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} \frac{R_4}{R_5} \quad \text{con } \omega = \infty$$

$$K(PB) = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{con } \omega = 0$$

$$|K(BP)| = \frac{R_1}{R_4} \quad \text{con } \omega = \omega_o \quad (11)$$

Este tipo de celda, que cuenta con una entrada ( $V_i$ ) y varias salidas ( $V_{PB}$ ,  $V_{BP}$  y  $V_{PA}$ ), se la conoce como un sistema SIMO, debido a sus siglas del ingles “single-in multi-out”<sup>3</sup>. Se destaca también que la etapa que cumple el rol de pasa banda es inversora, mientras que las etapas de pasa bajos y altos no. Por otro lado, en caso de ser deseado que esta celda funcione como un rechaza banda o pasa todo, se debe agregar un cuarto amplificador operacional que actúe como restador de las tres señales previamente mencionadas para el caso del pasa todo, o entre las etapas pasa bajos y altos, para obtener el rechaza bandas<sup>4</sup>.

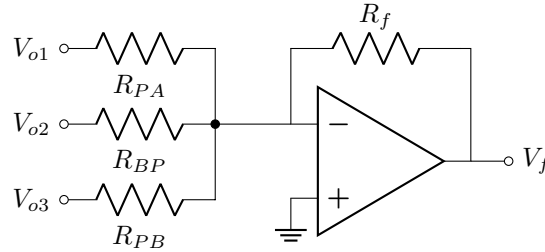


Figura 3: Configuración restadora para obtener un rechaza banda con filtro KHN.

### 0.1.2. Tow-Thomas (TT)

La celda Tow-Thomas, nombre dado por sus creadores<sup>56</sup> surge como una variación de la celda KHN. A esta última, se la modifica buscando aprovechar una realimentación negativa a base de una implementación RC. De esta forma, se logra alejar las frecuencias naturales del eje  $j\omega$  por sobre el semiplano izquierdo. Esto lleva al desarrollo del siguiente diagrama de bloques.

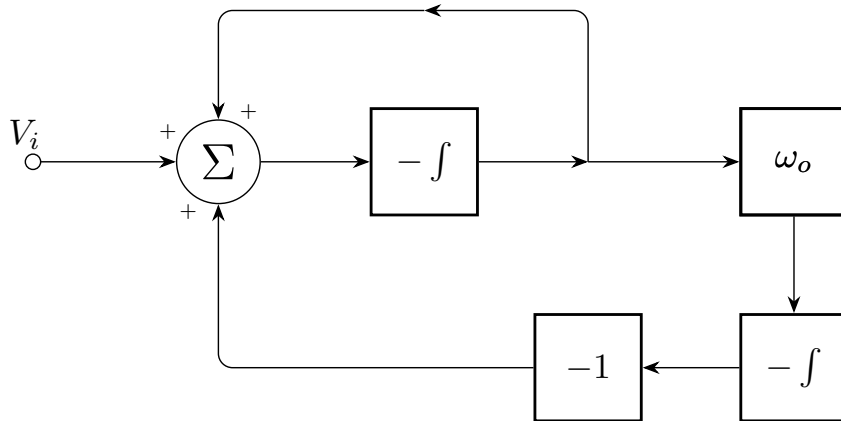


Figura 4: Diagrama de bloques de la celda TT.

Desarrollando lo mostrado previamente en un circuito, se obtiene lo presentado en la Figura (5).

<sup>3</sup>R. Raut and M. N. S. Swamy, Modern Analog Filter Analysis and Design, 1st. ed. Weinheim: John Wiley and Sons, 2010.

<sup>4</sup>A. Sedra and K. Smith, Microelectronic Circuits, 5th ed. New York: Oxford University Press, 1991.

<sup>5</sup>J. Tow, “Design formulas for active RC filters using operational-amplifier biquad,” *Electronics Letters*, vol. 5, no. 15, pp. 339–341, Jul. 1969.

<sup>6</sup>L. C. Thomas, “The Biquad: Part I-Some practical design considerations,” *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 3, pp. 350–357, 1971.

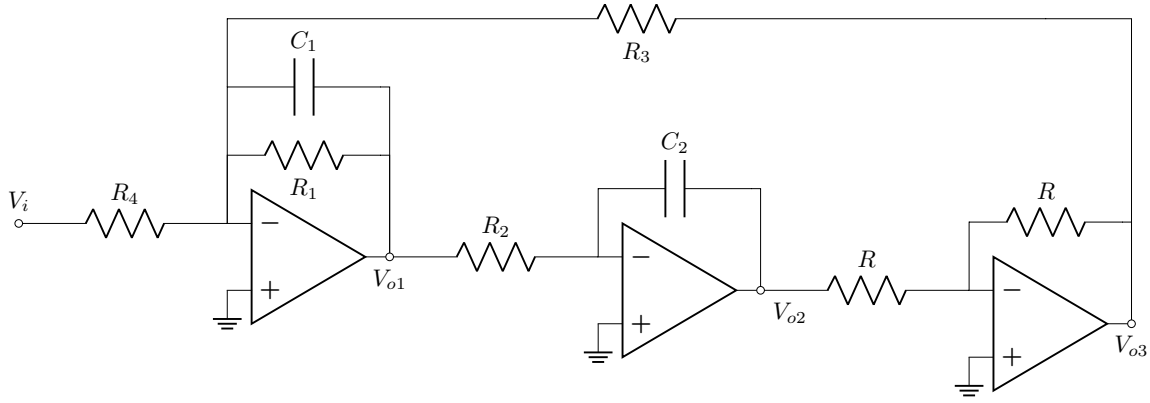


Figura 5: Celda TT.

Analizando la tensión a la salida de cada operacional, se obtiene

$$\frac{V_{o1}}{V_i} = -\frac{s}{R_4 C_1} \frac{1}{D(s)} \quad (12)$$

$$\frac{V_{o2}}{V_i} = \frac{1}{R_2 R_4 C_1 C_2} \frac{1}{D(s)} \quad (13)$$

$$\frac{V_{o3}}{V_i} = -\frac{V_{o2}}{V_i} \quad (14)$$

Siendo

$$D(s) = s^2 + \frac{s}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \quad (15)$$

De de la misma forma que con la celda KHN, de (15), se obtiene

$$\begin{aligned} \omega_o &= \sqrt{\frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}} \\ Q &= R_1 \sqrt{\frac{C_1}{R_2 R_3 C_2}} \end{aligned} \quad (16)$$

Análogamente al caso anterior, se destaca el hecho de que la frecuencia  $\omega_o$  es independiente de  $R_1$ , lo que permite modificar el factor  $Q$  sin afectar a la otra variable.

Se denota además que  $V_{BP} = V_{o1}$  y  $V_{PB} = V_{o2}$ . Es así que la celda TT permite obtener un filtro pasa bandas y dos pasa bajos, siendo uno de ellos inversor. Este circuito no posee una transferencia que cumpla la función de pasa altos, por lo tanto, tampoco posee directamente una función de rechaza banda o pasa todo, al igual que la celda KHN.

### 0.1.3. Ackerberg-Mossberg

### 0.1.4. Fleischer-Tow