

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

# Trabajo Práctico N°5: Filtros Activos y Celdas Teoría de Circuitos - 2019

Grupo 1:

Farall, Facundo David  
Gaytan, Joaquín Oscar  
Kammann, Lucas  
Maselli, Carlos Javier  
Müller, Malena

Profesores:

Jacoby, Daniel Andrés  
Belaustegui Goitia, Carlos  
Iñaki Iribarren, Rodrigo

22 de octubre de 2019

# Índice

<b>1. Celda Sallen-Key</b>	<b>3</b>
1.1. Análisis ideal	3
1.1.1. Función transferencia y parámetros	3
1.1.2. Sensibilidades	4
1.1.3. Métodos de ajuste	4
1.1.4. Rango dinámico	8
1.1.5. Impedancia de entrada	8
1.2. Análisis real	8
1.2.1. Función transferencia	8
1.2.2. Impedancia de entrada	8
1.2.3. Impedancia de salida	8
1.3. Diseño de un filtro con Legendre	8
1.3.1. Especificaciones y función aproximación	8
1.3.2. Diseño de etapas	8
1.3.3. Simulación y verificación	8
1.3.4. Diseño de PCB	8
1.3.5. Resultados prácticos	8
1.4. Diseño de un filtro con Bessel	8
1.4.1. Especificaciones y función aproximación	8
1.4.2. Diseño de etapas	8
1.4.3. Simulación y verificación	8
1.4.4. Diseño de PCB	8
1.4.5. Resultados prácticos	8
1.5. Conclusiones	8
<b>2. Celda Rauch (Deliyannis - Friend modificada)</b>	<b>9</b>
<b>3. Sedra-Ghorab-Martin</b>	<b>10</b>
<b>4. Celda Universal</b>	<b>11</b>

# 1. Celda Sallen-Key

El objetivo de esta sección es la construcción de dos filtros que cumplan con un conjunto de especificaciones, empleando para el diseño en cascada la celda Sallen-Key. Para esto último, es necesario primero realizar un análisis ideal y real de dicha celda para obtener ciertas conclusiones que faciliten el proceso de diseño e impongan restricciones sobre las exigencias que se definan a cada etapa. Es importante aclarar que sólo se analizará la celda pasabajos de Sallen-Key dado que es la única necesaria para la realización de los filtros en cuestión.

## 1.1. Análisis ideal

En el siguiente análisis se asume un comportamiento ideal del amplificador operacional, considerando una impedancia de entrada del mismo  $Z_{IN} \rightarrow \infty$ , corrientes de entrada e impedancia de salida nulas, y finalmente una ganancia también  $A_{VOL} \rightarrow \infty$ .

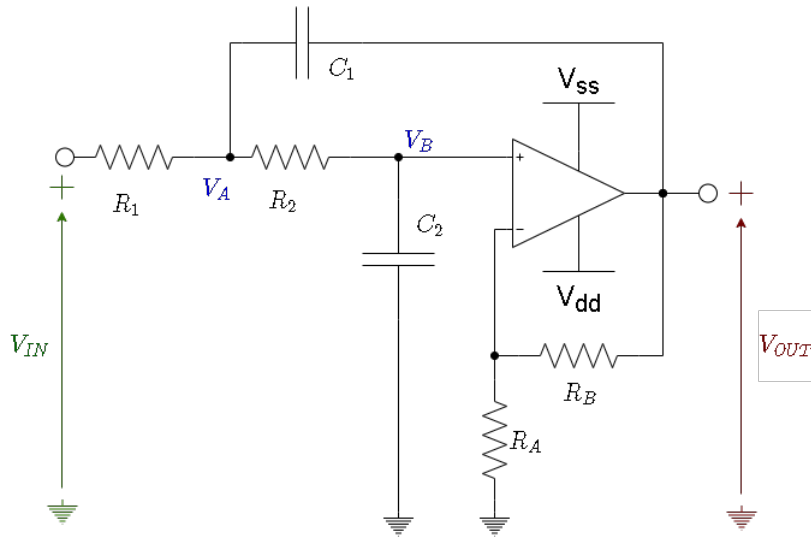


Figura 1: Celda Sallen-Key para pasabajos

### 1.1.1. Función transferencia y parámetros

Dentro del marco de los criterios expuestos anteriormente, para hallar la función transferencia se define el parámetro de ganancia de la celda  $K$ , y luego se plantean un conjunto de ecuaciones empleando las leyes de Kirchhoff. Finalmente, el sistema se resuelve y se obtiene la función  $H(s)$  de la cual se deducen parámetros característicos como  $\omega_o$  y  $Q$ .

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

$$V_o = V_b \cdot K$$

$$V_b = V_a \cdot \frac{\frac{1}{s \cdot C_2}}{\frac{1}{s \cdot C_2} \cdot R_2}$$

$$\frac{V_i - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{\frac{1}{s \cdot C_1}} + \frac{V_a - V_b}{R_2}$$

$$H(s) = \frac{K}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot s^2 + s \cdot [C_2 \cdot (R_1 + R_2) + C_1 \cdot R_1 \cdot (1 - K)] + 1} \quad (2)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}}{C_2 \cdot (R_1 + R_2) + C_1 \cdot R_1 \cdot (1 - K)} \quad (4)$$

A partir de estos resultados se puede observar que el parámetro definido  $K$  corresponde a la ganancia de la banda de paso, o en continua. Por otro lado, es importante señalar la influencia de tal ganancia, entre otras variables, sobre el valor de la selectividad  $Q$  del circuito. Esto último deberá ser tenido en cuenta en el análisis de sensibilidades.

### 1.1.2. Sensibilidades

En el siguiente análisis se emplea la definición de sensibilidades relativas para cada una de las magnitudes o parámetros característicos de la función transferencia. Esto es, calcular  $S_x^y = \frac{x_o}{y(x_o)} \cdot \frac{\delta y}{\delta x}$ .

$R_A$	$R_B$	$R_1$	$R_2$	$C_1$	$C_2$
0	0	$\frac{-1}{2}$	$\frac{-1}{2}$	$\frac{-1}{2}$	$\frac{-1}{2}$

Tabla 1: Sensibilidades de  $\omega_o$

$R_A$	$R_B$	$R_1$	$R_2$	$C_1$	$C_2$
$\frac{1}{K} - 1$	$1 - \frac{1}{K}$	0	0	0	0

Tabla 2: Sensibilidades de  $K$

$R_A$	0
$R_B$	0
$R_1$	$\frac{1}{2} - Q \cdot \frac{R_1 \cdot [C_2 + C_1 \cdot (1 - K)]}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}}$
$R_2$	$\frac{1}{2} - Q \cdot \sqrt{\frac{C_2 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_1}}$
$C_1$	$\frac{1}{2} - Q \cdot \left[ \sqrt{\frac{C_1 \cdot R_1}{C_2 \cdot R_2}} + \sqrt{\frac{C_1 \cdot R_2}{C_2 \cdot R_1}} \right]$
$C_2$	$\frac{1}{2} - Q \cdot (1 - K) \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot C_2}{R_2 \cdot C_1}}$

Tabla 3: Sensibilidades de  $Q$

### 1.1.3. Métodos de ajuste

En el proceso de diseño en cascada, para la composición de cada una de las etapas se realiza una agrupación de ceros y polos acordes para la formación de una función transferencia que pueda ser implementada por alguna de las celdas existentes o disponibles, no obstante su implementación requiere de un proceso de

ajuste para garantizar el diseño menos sensible a variaciones por imperfecciones de los componentes o efectos parásitos de los mismos. En este apartado se proponen y analizan diferentes métodos o enfoques de diseño, determinando sus beneficios al momento de ajustar los parámetros de la celda a la etapa deseada.

**Diseño por componentes iguales:** Como estrategia de diseño para facilitar la elección de componentes ante los grados de libertad de los cuales se disponen, se propone  $R = R_1 = R_2$  y luego  $C = C_1 = C_2$ . De esta imposición se simplifican las expresiones de los parámetros y de las sensibilidades, obteniendo:

$$\omega_o = \frac{1}{R \cdot C} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{3 - K} \quad (6)$$

$R_A$	0
$R_B$	0
$R_1$	$\frac{1}{2} - Q \cdot (2 - K)$
$R_2$	$\frac{1}{2} - Q$
$C_1$	$\frac{1}{2} - Q \cdot 2$
$C_2$	$\frac{1}{2} - Q \cdot (1 - K)$

Tabla 4: Sensibilidades de  $Q$

Estos resultados revelan que si bien es más simple la elección de componentes, el ajuste de la celda se vuelve más complejo cuando la etapa requiere una selectividad alta, provocando que ante variaciones de los componentes, para sistemas de selectividad muy alta, cambie el comportamiento del sistema drásticamente. No obstante, este enfoque puede simplificar el proceso de diseño en los casos donde se requiera un  $Q$  bajo.

**Diseño por componentes proporcionales:** Como estrategia se impone que no haya ganancia de banda de paso en esta etapa, es decir que  $K = 1$ , y luego que los componentes sean proporcionales entre sí, para lo cual se definen dos constantes de proporcionalidad tomando como referencia  $R_2 = R \Rightarrow R_1 = m \cdot R$  y  $C_2 = C \Rightarrow C_1 = n \cdot C$ .

$$\omega_o = \frac{1}{R \cdot C \cdot \sqrt{m \cdot n}} \quad (7)$$

$$Q = \frac{\sqrt{m \cdot n}}{1 + m} \quad (8)$$

$R_A$	0
$R_B$	0
$R_1$	$\frac{1}{2} - \frac{m}{1+m}$
$R_2$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{1+m}$
$C_1$	$\frac{1}{2} - n$
$C_2$	$\frac{1}{2}$

Tabla 5: Sensibilidades de  $Q$

En primer lugar uno de los beneficios de esta estrategia es poder imponer restricciones adicionales sobre el diseño, como asignar valores a  $m$  o a  $n$  por separado. Esto último permitiría según el caso minimizar la sensibilidad, suponiendo por ejemplo que  $m = 1$ , o en otro caso que  $n = \frac{1}{2}$ . Es importante aclarar que según el enfoque aplicado, los valores de referencia  $R$  y  $C$  son utilizados para determinar el valor de la frecuencia de corte del filtro, no obstante las proporcionalidades permiten ajustar además la selectividad, con lo cual sólo uno de los dos criterios para minimizar la sensibilidad puede ser utilizado. En segundo lugar, se puede observar que a diferencia de antes la estabilidad frente a variaciones de los valores nominales de componentes es mayor, no obstante esto implica una cota superior a la selectividad que puede garantizar esta celda, para el caso donde  $m = 1$  y luego,  $Q = \frac{\sqrt{n}}{2}$ .

En conclusión, este enfoque de diseño permite según se tenga mayor probabilidad de variaciones en los capacitores o resistencias, ajustar las sensibilidades para minimizar el efecto de tales componentes, y además definir los valores de forma más simplificada. Además, al buscar que  $K = 1$ , se reduce el amplificador a un seguidor de tensión o buffer, lo cual tiene sus ventajas al reducir los componentes necesarios y aumentar el ancho de banda de tal etapa.

**Diseño con atenuación:** Es posible que durante el uso de etapas se necesite una determinada atenuación en la misma si se considera que la entrada puede ser de alta señal, volviéndose susceptible a saturar y distorsionar. Esto último, como se verá posteriormente, afectará directamente al rango dinámico de la celda diseñada. Por lo tanto, es deseable poder imponer una atenuación que mejore tales características, pero en la configuración propuesta no se puede conseguir un  $K < 1$ , salvo que se utilicen resistencias negativas con algún circuito adicional pero eso agregaría complejidad. Entonces, para solucionarlo se propone agregar una resistencia que produzca una división de tensión, de forma tal que al aplicar el teorema de Thevenin, todo el análisis previo es replicable asumiendo que la  $R_1 = R_{TH} = R_{1A} // R_{1B}$ .

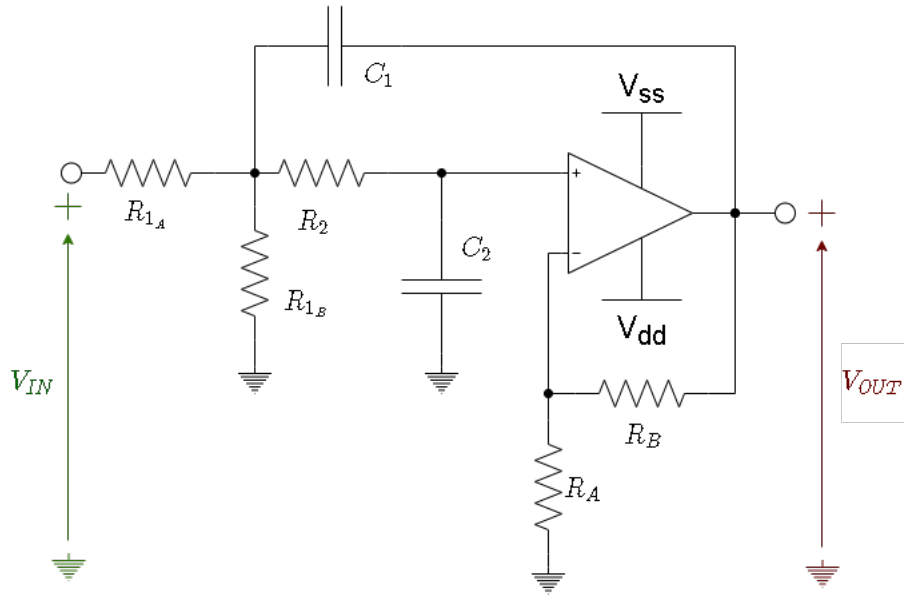


Figura 2: Circuito Sallen-Key pasabajos con atenuación

$$A = \frac{R_{1B}}{R_{1A} + R_{1B}} \quad (9)$$

$$H(s) = \frac{K \cdot A}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot s^2 + s \cdot [C_2 \cdot (R_1 + R_2) + C_1 \cdot R_1 \cdot (1 - K)] + 1} \quad (10)$$

- 1.1.4. Rango dinámico
- 1.1.5. Impedancia de entrada
- 1.2. Análisis real
  - 1.2.1. Función transferencia
  - 1.2.2. Impedancia de entrada
  - 1.2.3. Impedancia de salida
- 1.3. Diseño de un filtro con Legendre
  - 1.3.1. Especificaciones y función aproximación
  - 1.3.2. Diseño de etapas
  - 1.3.3. Simulación y verificación
  - 1.3.4. Diseño de PCB
  - 1.3.5. Resultados prácticos
- 1.4. Diseño de un filtro con Bessel
  - 1.4.1. Especificaciones y función aproximación
  - 1.4.2. Diseño de etapas
  - 1.4.3. Simulación y verificación
  - 1.4.4. Diseño de PCB
  - 1.4.5. Resultados prácticos
- 1.5. Conclusiones



## **2. Celda Rauch (Deliyannis - Friend modificada)**

### **3. Sedra-Ghorab-Martin**

#### 4. Celda Universal