

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

4 de noviembre de 2019

ÍNDICE

1. Celda Sallen-Key	3
2. Celda Rauch (Deliyannis - Friend modificada)	4
3. Sedra-Ghorab-Martin	5
4. Celdas Universales	6
4.1. Introducción teórica	6
4.2. Configuraciones correspondientes a distintas celdas universales: Análisis ideal	7
4.3. Celda 2do orden Kerwin-Huelsman-Newcomb (KHN): Análisis ideal	7
4.3.1. Función transferencia y parámetros	8
4.3.2. Sensibilidades	8
4.3.3. Impedancia de entrada	8
4.3.4. Impedancia de salida	8
4.4. Celda 2do orden Tow-Thomas: Análisis ideal	9
4.4.1. Función transferencia y parámetros	9
4.4.2. Sensibilidades	10
4.4.3. Impedancia de entrada	10
4.4.4. Impedancia de salida	10
4.5. Celda 2do orden Akerberg-Mossberg: Análisis ideal	10
4.5.1. Función transferencia y parámetros	11
4.5.2. Sensibilidades	11
4.5.3. Impedancia de entrada	11
4.5.4. Impedancia de salida	11
4.5.5. Celda 2do orden Fleischer-Tow: Análisis ideal	11
4.5.6. Función transferencia y parámetros	12
4.5.7. Sensibilidades	12
4.6. Diseño de filtro rechaza banda mediante la aproximación Chebychev Inverso	13
4.6.1. Especificaciones del filtro y aproximación	13
4.6.2. Selección de celda y diseño de etapas	14
4.6.3. Celda 2do orden Fleischer-Tow: Análisis real	14
4.6.4. Simulación y verificación	14
4.6.5. Diseño de PCB	14
4.6.6. Resultados obtenidos y análisis	14
4.7. Conclusiones	14

1. CELDA SALLEN-KEY

2. CELDA RAUCH (DELIYANNIS - FRIEND MODIFICADA)

3. SEDRA-GHORAB-MARTIN

4. CELDAS UNIVERSALES

En esta sección se analizan distintas celdas universales, es decir, celdas de configuraciones diferentes que están compuestas por dos integradores. Las celdas en estudio son la Kerwin-Huelsman-Newcomb, la Tow-Thomas, la Ackerberg-Mossberg y la Fleischer-Tow. La finalidad de dicho análisis es luego realizar un filtro rechaza banda a partir de una aproximación de Chebychev Inverso que cumpla las siguientes especificaciones:

f_{∞}	51kHz
notch depth	$\geq 50dB$
Δf_a	600Hz
Δf_p	10kHz
A_a	40dB
A_p	6dB
G	$[-3:3]dB$
$ Zin(f) $	$\geq 50k\Omega$
Cantidad de ceros de transmisión	≥ 2

Tabla 4.1: Especificaciones del filtro rechaza banda a realizar.

El análisis que se llevará a cabo para cada celda es tanto ideal como real, para poder comprender las características que determinarán si es posible o no implementar cada celda para lograr el filtro especificado. Una vez determinadas las ventajas y desventajas de cada celda frente al filtro que se desea realizar, se hará un mayor enfoque en la celda elegida para llevar el filtro a la práctica.

ver si esto
queda o no

4.1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Se comienza analizando el comportamiento de circuitos compuestos por dos integradores, representandolos mediante diagramas en bloques. El siguiente diagrama de la figura 4.1¹ es una representación simple que permite entender lo que se desarrolla luego.

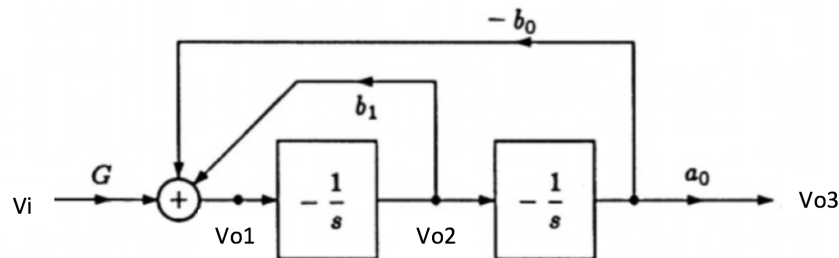


Figura 4.1: Representación en bloques de un circuito simple de segundo orden formado por dos integradores.

Del diagrama anterior, se obtienen las siguientes expresiones, a partir de las cuales se puede apreciar que se trata de un circuito de orden 2.

$$\begin{cases} Vo_2 = -\frac{1}{2} \cdot Vo_1 \\ Vo_3 = -\frac{1}{2} \cdot Vo_2 \\ H(s) = \frac{Vo_3}{Vi} = G \cdot \frac{a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \end{cases} \quad (4.1)$$

Si ahora se suman a la salida las tensiones Vo_1 y Vo_2 como se muestra en el diagrama de la siguiente figura 4.2:

¹Adaptación de una imagen obtenida de: <https://elxcompacme.files.wordpress.com/2014/03/filter-kendell-su.pdf>

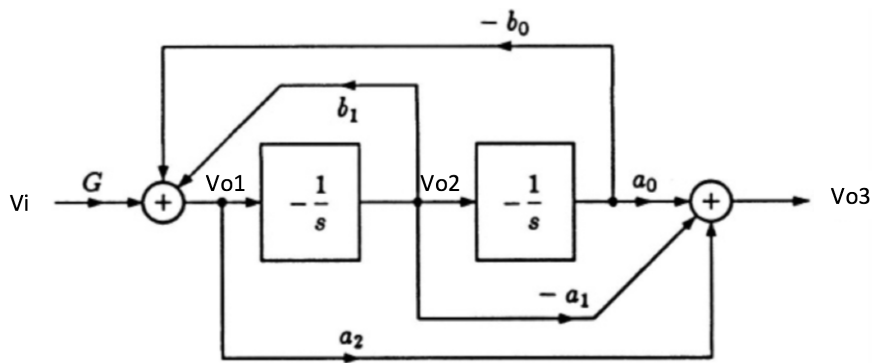


Figura 4.2: Misma representación en bloques que antes pero sumando las tensiones Vo_1 y Vo_2 a la salida.

Así se obtiene:

$$\frac{Vo_3}{Vi} = G \cdot \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \quad (4.2)$$

Las configuraciones que se analizan a continuación están basadas en modificaciones sobre este último diagrama de la figura 4.2 y su ecuación correspondiente 4.4

4.2. CONFIGURACIONES CORRESPONDIENTES A DISTINTAS CELDAS UNIVERSALES: ANÁLISIS IDEAL

A continuación se detallan las configuraciones de las cuatro celdas universales previamente enunciadas. Junto a la configuración circuital de cada una de estas celdas, se presenta su función transferencia, la ganancia G , los parámetros Q y ω_0 ; y sus sensibilidades relativas respecto a cada componente que conforma el circuito. Para esto, se hace un análisis en el que los amplificadores operacionales son considerados ideales. Es decir, se considera que cada amplificador operacional cuenta con las siguientes características:

$$\begin{cases} Z_{in} \rightarrow \infty \\ A_{VOL} \rightarrow \infty \\ Z_{out} \rightarrow 0\Omega \\ I_{in+} = I_{in-} = 0A \end{cases} \quad (4.3)$$

2

citar la página esta de internet

4.3. CELDA 2DO ORDEN KERWIN-HUELSMAN-NEWCOMB (KHN): ANÁLISIS IDEAL

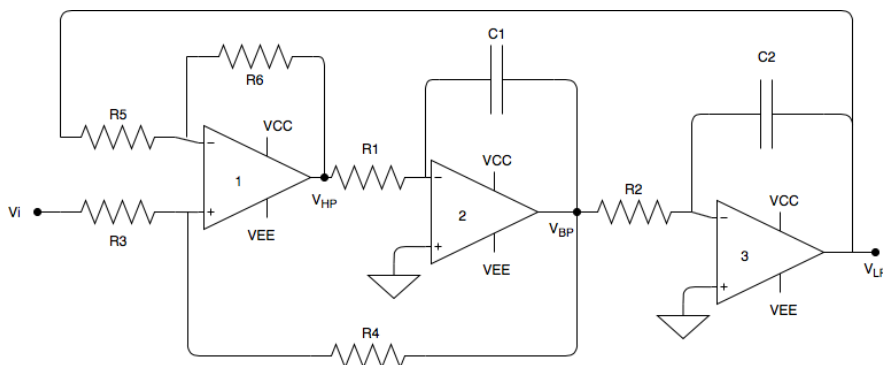


Figura 4.3: Circuito Kerwin-Huelsman-Newcomb

²<https://elxcompacme.files.wordpress.com/2014/03/filter-kendell-su.pdf>

4.3.1. FUNCIÓN TRANSFERENCIA Y PARÁMETROS

Salida	$H(s)$	G	ω_0	Q
LP	$\frac{\frac{R_4}{R_5 R_1 R_2 C_1 C_2} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4}}{S^2 + \frac{R_3}{R_5 R_1 C_1} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} s + \frac{R_6}{R_5 R_1 R_2 C_1 C_2}}$	$\frac{R_4 (R_5 + R_6)}{R_6 (R_3 + R_4)}$		
BP	$-\frac{\frac{R_4}{R_5 R_1 C_1} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} s}{S^2 + \frac{R_3}{R_5 R_1 C_1} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} s + \frac{R_6}{R_5 R_1 R_2 C_1 C_2}}$	$-\frac{R_4}{R_3}$	$\sqrt{\frac{R_4 (R_5 + R_6)}{R_6 (R_3 + R_4)}}$	$\frac{R_5 (R_3 + R_4)}{R_3 (R_5 + R_6)} \cdot \sqrt{\frac{R_6 R_1 C_1}{R_5 R_2 C_2}}$
HP	$-\frac{\frac{R_4}{R_5} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} S^2}{S^2 + \frac{R_3}{R_5 R_1 C_1} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_3 + R_4} s + \frac{R_6}{R_5 R_1 R_2 C_1 C_2}}$	$\frac{R_4 (R_5 + R_6)}{R_5 (R_3 + R_4)}$		

Tabla 4.2: Características de la celda Kerwin-Huelsman-Newcomb.

4.3.2. SENSIBILIDADES

	ω_0	Q	G_{LP}	G_{BP}	G_{HP}
R_1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0
R_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0
R_3	0	$-\frac{R_4}{R_3 + R_4}$	$-\frac{R_3}{R_3 + R_4}$	-1	$-\frac{R_3}{R_3 + R_4}$
R_4	0	$\frac{R_4}{R_3 + R_4}$	$\frac{R_3}{R_3 + R_4}$	1	$\frac{R_3}{R_3 + R_4}$
R_5	$-\frac{1}{2}$	$\frac{R_6 - R_5}{2(R_5 + R_6)}$	$\frac{R_5}{R_5 + R_6}$	0	$-\frac{R_6}{R_5 + R_6}$
R_6	$\frac{1}{2}$	$-\frac{R_6 - R_5}{2(R_5 + R_6)}$	$-\frac{R_5}{R_5 + R_6}$	0	$\frac{R_6}{R_5 + R_6}$
C_1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0
C_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0

Tabla 4.3: Sensibilidades de la celda Kerwin-Huelsman-Newcomb.

Esta celda tiene sensibilidades bajas.

4.3.3. IMPEDANCIA DE ENTRADA

completar

4.3.4. IMPEDANCIA DE SALIDA

La salida del circuito se encuentra a la salida de un amplificador operacional con realimentación negativa. Se indicó previamente que la impedancia de salida de un amplificador operacional ideal es $Z_{out} \rightarrow 0$, lo que implica que la impedancia de salida del circuito también tienda a cero.

$$\begin{cases} Vo_2 = -\frac{1}{2} \cdot Vo_1 \\ Vo_3 = -\frac{1}{2} \cdot Vo_2 \\ H(s) = \frac{Vo_3}{Vi} = G \cdot \frac{a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \end{cases} \quad (4.4)$$

Dependiendo de dónde se tome la salida del circuito 4.3, se puede obtener un filtro pasa altos, un pasa banda o un pasabajos. Lo que sucede con Kerwin-Huelsman-Newcomb es que no brinda una salida rechaza banda. La misma puede igual lograrse agregándole al circuito 4.3 un sumador, como se muestra en la figura 4.4:

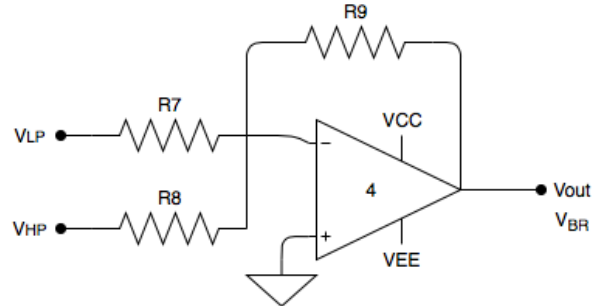


Figura 4.4: Sumador que se le agrega a la selda para obtener un rechaza banda.

4.4. CELDA 2DO ORDEN TOW-THOMAS:ANÁLISIS IDEAL

La celda Tow-Thomas varía frente a la Kerwin-Huelsman-Newcomb al tener juntos a la entrada el sumador y el primer integrador, agregando luego un inversor y una resistencia en la realimentación que va de la salida V_{LP} a la entrada del circuito. Esta nueva configuración, al igual que en la Kerwin-Huelsman-Newcomb sigue teniendo una salida de pasa bajos y una de pasa banda, pero ya no tiene una de pasa altos.

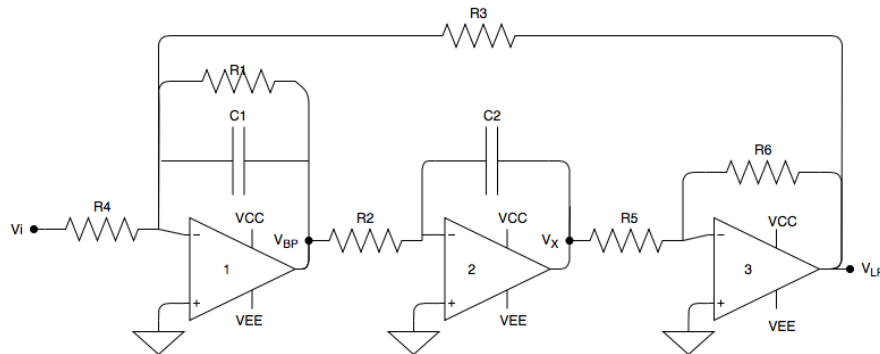


Figura 4.5: Celda Tow-Thomas

4.4.1. FUNCIÓN TRANSFERENCIA Y PARÁMETROS

Los parámetros correspondientes a la celda Tow-Thomas son los siguientes:

Salida	$H(s)$	G	ω_0	Q
LP	$-\frac{\frac{R_6/R_5}{R_2 R_4 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{R_6/R_5}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$	$-\frac{R_3}{R_4}$	$\sqrt{\frac{R_6/R_5}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$	$\frac{R_1}{\sqrt{R_2 R_3}} \sqrt{\frac{R_6 C_1}{R_5 C_2}}$
BP	$-\frac{\frac{1}{R_4 C_1} s}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{R_6/R_5}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$	$-\frac{R_1}{R_4}$		

Tabla 4.4: Características de la celda Tow-Thomas.

4.4.2. SENSIBILIDADES

	ω_0	Q	G_{LP}	G_{BP}
R_1	0	1	0	1
R_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0
R_3	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	0
R_4	0	0	-1	-1
R_5	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0
R_6	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
C_1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
C_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0

Tabla 4.5: Sensibilidades de la celda Tow-Thomas.

4.4.3. IMPEDANCIA DE ENTRADA

COMPLETAR

4.4.4. IMPEDANCIA DE SALIDA

Al igual que para la celda anterior, como la impedancia de salida del circuito es tomada a la salida de un amplificador operacional y dado que este es considerado ideal, la impedancia de salida del circuito tiende a cero.

4.5. CELDA 2DO ORDEN ACKERBERG-MOSSBERG: ANÁLISIS IDEAL

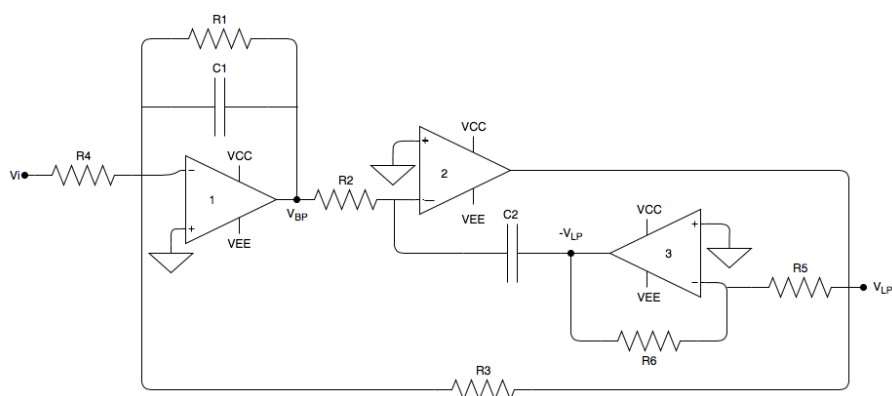


Figura 4.6: Celda Ackberg-Mossberg

4.5.1. FUNCIÓN TRANSFERENCIA Y PARÁMETROS

Salida	$H(s)$	G	ω_0	Q
LP	$-\frac{\frac{R_5}{C_1 C_2 R_2 R_4 R_6}}{s^2 + \frac{1}{C_1 R_1} s + \frac{R_5}{C_1 C_2 R_2 R_3 R_6}}$	$-\frac{R_3}{R_4}$	$\sqrt{\frac{R_5}{C_1 C_2 R_2 R_3 R_6}}$	$C_1 R_1 \sqrt{\frac{R_5}{C_1 C_2 R_2 R_3 R_6}}$
BP	$-\frac{\frac{1}{C_1 R_4} s}{s^2 + \frac{1}{C_1 R_1} s + \frac{R_5}{C_1 C_2 R_2 R_3 R_6}}$	$-\frac{R_1}{R_4}$		

Tabla 4.6: Características de la celda Ackerberg-Mossberg.

4.5.2. SENSIBILIDADES

	ω_0	Q	G_{LP}	G_{BP}
R_1	0	1	0	1
R_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0
R_3	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	0
R_4	0	0	-1	-1
R_5	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
R_6	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0
C_1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
C_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0

Tabla 4.7: Sensibilidades de la celda Ackerberg-Mossberg.

chequear sensibilidad Q respecto a c1

4.5.3. IMPEDANCIA DE ENTRADA

completar

4.5.4. IMPEDANCIA DE SALIDA

Esta celda también presenta una impedancia de salida igual a cero al considerar los amplificadores operacionales como ideales, debido a que la salida del circuito es tomada a la salida de un amplificador operacional.

4.5.5. CELDA 2DO ORDEN FLEISCHER-TOW: ANÁLISIS IDEAL

Una característica importante a remarcar de la selda Flesicher-Tow es que, a diferencia de las celdas anteriores, permite realizar cualquier tipo de filtro de segundo orden sin la necesidad de agregar otro amplificador operacional. Como se ha estudiado en trabajos prácticos anteriores, el amplificador operacional tiene ciertas limitaciones para un circuito, debidas al slew rate, a la saturación, entre otras; por lo que es ventajoso el hecho de no tener que agregar un amplificador operacional para obtener un filtro rechaza banda.

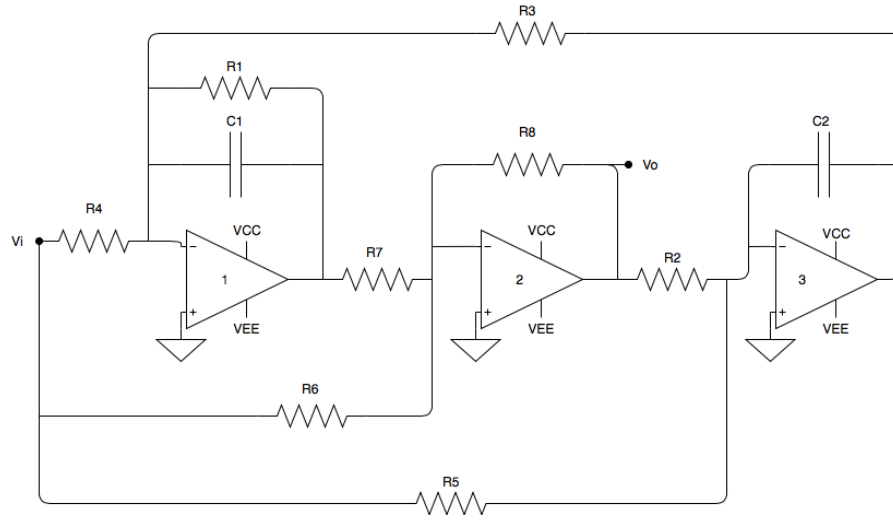


Figura 4.7: Celda Fleischer-Tow

4.5.6. FUNCIÓN TRANSFERENCIA Y PARÁMETROS

$H(s)$ genérica	ω_0	Q
$-\frac{\frac{R_8}{R_6} s^2 + \left(\frac{R_8}{R_6 R_1 C_1} - \frac{R_8}{R_4 R_7 C_1} \right) s + \frac{R_8}{R_3 R_5 R_7 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$\sqrt{\frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$R_1 C_1 \sqrt{\frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$

Tabla 4.8: Expresiones genéricas de la celda Fleischer-Tow.

Salida	Condiciones	$H(s)$	G	ω_0	Q
LP	$R_6 = R_4 = \infty$	$-\frac{\frac{R_8}{R_3 R_5 R_7 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$-\frac{R_2}{R_5}$		
BP	$R_6 = R_5 = \infty$	$\frac{\left(\frac{R_8}{R_4 R_7 C_1} \right) s}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$\frac{R_1 R_8}{R_4 R_7}$	$\sqrt{\frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$R_1 C_1 \sqrt{\frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$
HP	$R_5 = \infty$ $R_1 R_6 = R_4 R_7$	$-\frac{\frac{R_8}{R_6} s^2}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$-\frac{R_8}{R_6}$		
BR	$R_1 R_6 = R_4 R_7$	$-\frac{\frac{R_8}{R_6} s^2 + \frac{R_8}{R_3 R_5 R_7 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_1} s + \frac{R_8}{R_2 R_3 R_7 C_1 C_2}}$	$-\frac{R_2}{R_5}$		

Tabla 4.9: Características de la celda Fleischer-Tow.

4.5.7. SENSIBILIDADES

ver si agregar los tipos de notch

	ω_0	Q	G_{LP}	G_{BP}	G_{HP}	G_{BR}
R_1	0	1	0	1	0	0
R_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	0	0	1
R_3	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0
R_4	0	0	0	-1	0	0
R_5	0	0	-1	0	0	-1
R_6	0	0	0	0	-1	0
R_7	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-1	0	0
R_8	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	1	1	0
C_1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
C_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0

Tabla 4.10: Sensibilidades de la celda Fleischer-Tow

4.6. DISEÑO DE FILTRO RECHAZA BANDA MEDIANTE LA APROXIMACIÓN CHEBYCHEV INVERSO

4.6.1. ESPECIFICACIONES DEL FILTRO Y APROXIMACIÓN

A continuación se transcribe la tabla que cuenta con las especificaciones del filtro a realizar, que fue introducida al inicio de esta sección, para facilitar la lectura y la comprensión del análisis que sigue.

f_∞	51kHz
notch depth	$\geq 50dB$
Δf_a	600Hz
Δf_p	10kHz
A_a	40dB
A_p	6dB
G	$[-3 : 3]dB$
$ Zin(f) $	$\geq 50k\Omega$
Cantidad de ceros de transmisión	≥ 2

Tabla 4.11: Especificaciones del filtro rechaza banda a realizar.

La finalidad de implementar un filtro a partir de una aproximación es adquirir precisión y selectividad, como lo son las especificaciones de la tabla 4.11. Al aumentar la selectividad de un filtro, el mismo deja de poder ser realizado con un solo filtro de orden 1 ó 2, y es así como surge la necesidad de usar un filtro de un orden mayor. Para esto, existen distintas aproximaciones que permiten no solo realizar un filtro de orden mayor, si no que además brindan la posibilidad de realizar un filtro de orden mayor a dos a partir de la conexión en cascada de varios filtros de orden 2 ó 1, cuya cantidad depende del orden del circuito completo. Se pidió que el filtro fuera obtenido con la aproximación de Chebychev Inverso (Chebychev II) y que el filtro tuviera por lo menos dos ceros de transmisión. La aproximación de Chebychev Inverso exige la presencia de ceros de transmisión, es decir, ceros ubicados sobre el eje imaginario (el eje $j\omega$) de la frecuencia.

PONER todo lo de cheby. formulas y resultados obtenidos, los q, orden, polos etc.

4.6.2. SELECCIÓN DE CELDA Y DISEÑO DE ETAPAS

Previamente fueron mostradas las características de cada celda. Para obtener un notch, es necesario emplear una celda que tenga una salida de notch, o bien utilizar una salida pasa bajos sumada con una pasa altos. Ya que la celda Tow-Thomas y la Ackerberg-Mossberg presentan únicamente salida pasabajos y pasabanda, no se empleará dicha celda al no tener la posibilidad de formar un notch, debido a que no tienen una salida pasa altos. Por lo tanto las opciones son la celda

seguir

4.6.3. CELDA 2DO ORDEN FLEISCHER-TOW: ANÁLISIS REAL

4.6.4. SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN

4.6.5. DISEÑO DE PCB

4.6.6. ANÁLISIS RESULTADOS OBTENIDOS

4.7. CONCLUSIONES