

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

22.01 TEORÍA DE CIRCUITOS

TRABAJO PRÁCTICO FINAL

Filtro Final

Grupo 5:

Matías LARROQUE
Leg. 56597

Lucero Guadalupe FERNANDEZ
Leg. 57485

Manuel MOLLÓN
Leg. 58023

Ezequiel VIJANDE
Leg. 58057

Profesor:

Daniel JACOBY
Carlos BELAUSTEGUI GOITIA
Rodrigo IRIBARREN

Entregado: 27 de Noviembre de 2018

Índice

1. Introducción	2
2. Objetivos y resumen	3
3. Análisis teórico	4
3.1. Polos, ceros y agrupación de Etapas	4
3.2. Primera Etapa	4
3.3. Segunda etapa	4
3.4. Tercera etapa	5
3.5. Cuarta etapa	5
3.6. Quinta etapa	6
3.7. Sexta etapa	6
3.8. Celda Fleischer-Tow	7
3.8.1. Función transferencia	7
3.8.2. Impedancia de entrada	8
3.8.3. Impedancia de salida	8
4. Sensibilidades	9
5. Implementacion fisica	10
6. Análisis de rango dinámico	11
7. Limitaciones de carga	12
8. Estabilidad	13
9. Conclusiones	15

1. Introducción

En el siguiente trabajo se busco realizar la implementación física de un filtro que cumpla una determinada plantilla. Para realizar dicho filtro se diseñaron múltiples filtros de segundo orden y se dispuso de los mismos en conexión cascada.

Para el diseño del filtro se considero las sensibilidades de la celda elegida, los tipos de filtro a diseñar, impedancias de entrada y de salida así también como el rango dinámico del filtro.

2. Objetivos y resumen

El objetivo del filtro diseñado es el de cumplir la siguiente plantilla:

$A_p(dB)$	$A_s(dB)$	B	$f_p^-(KHz)$	$f_p^+(KHz)$	$f_a^-(KHz)$	$f_a^+(KHz)$	$f_0(KHz)$	Aprox	Rango dinámico(dB)
1	45	0.5	7.8	12.5	9.2	10.87	10	Cheby inverso	45

Cuadro 1: Plantilla a cumplir

Se desea que ademas de cumplir dicha plantilla, que el filtro no gane mas de 0dB para ninguna frecuencia así como que tambien cumpla las exigencias de la banda de paso para una frecuencia de hasta 100KHz.

Se dividió el filtro en múltiples etapas, cada una con una transferencia de segundo orden e implementada con una celda Fleischer Tow. Para todas las transferencias de segundo orden obtenidas se obtuvieron filtros Notch. Se utilizo un software para determinar la agrupación de polos y ceros de manera optima tal que se maximice el rango dinámico así como también el ordenamiento de las etapas.

3. Análisis teórico

3.1. Polos, ceros y agrupación de Etapas

Los polos y ceros se agruparon en etapas de segundo orden de forma tal que los pares de polos y ceros mas cercanos queden en la misma etapa. La lógica de este procedimiento es que los ceros y los polos tiendan a anularse por lo que se regularia en la ganancia mas cercana a 0dB posible. No es deseable que una etapa atenúe mucho, ya que se disminuiría la relación señal ruido y la próxima entrada recibiría una entrada pobre. Asimismo, tampoco es deseable que las etapas tengan ganancias elevadas ya que podrían generar entradas que causen alinealidades en la etapa siguiente (como por ejemplo saturación).

Para el ordenamiento de etapas se eligieron las mismas tal que las etapas de Q mas bajo sean las primeras y las de mayores Q sean las ultimas. Esto es para asegurar que los mayores sobrepicos estén al final de la configuración.

3.2. Primera Etapa

Para la primera etapa se obtuvo un filtro del tipo Low-Pass Notch. La gráfica del bode de la transferencia teórica a realizar es:

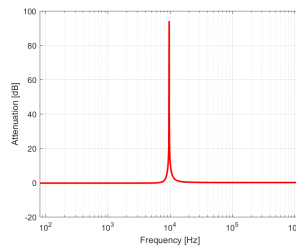


Figura 1: Gráfica de Atenuacion de la etapa 1

Los parámetros de dicho filtro son:

$f_0(kHz)$	Q	k
9.5	3.57	1

Cuadro 2: Parámetros de la etapa 1

3.3. Segunda etapa

Esta etapa consiste en un filtro High-Pass Notch. La gráfica de atenuación correspondiente es.

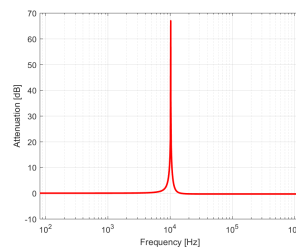


Figura 2: Atenuación de la etapa 2

Con los parámetros:

$f_0(kHz)$	Q	k
10.5	3.57	1

Cuadro 3: Parámetros de la etapa 2

3.4. Tercera etapa

Esta etapa consiste en un filtro Low-Pass Notch. La gráfica de atenuación correspondiente es.

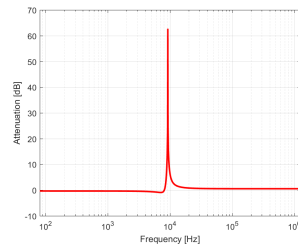


Figura 3: Atenuación de la etapa 3

Con los parámetros:

$f_0(kHz)$	Q	k
10.5	3.57	1

Cuadro 4: Parámetros de la etapa 3

3.5. Cuarta etapa

Esta etapa consiste en un filtro High-Pass Notch. La gráfica de atenuación correspondiente es.

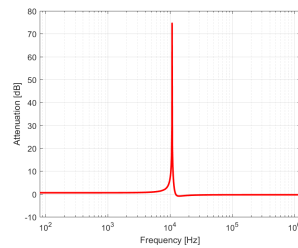


Figura 4: Atenuación de la etapa 4

Con los parámetros:

$f_0(kHz)$	Q	k
11.4	4.91	1

Cuadro 5: Parámetros de la etapa 4

3.6. Quinta etapa

Esta etapa consiste en un filtro Low-Pass Notch. La gráfica de atenuación correspondiente es.

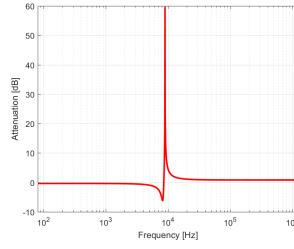


Figura 5: Atenuación de la etapa 5

Con los parámetros:

$f_0(kHz)$	Q	k
8.4	13.52	1

Cuadro 6: Parámetros de la etapa 5

3.7. Sexta etapa

Esta etapa consiste en un filtro High-Pass Notch. La gráfica de atenuación correspondiente es.

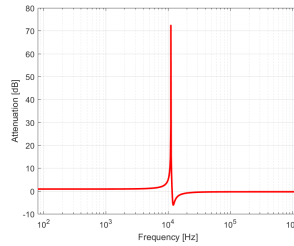


Figura 6: Atenuación de la etapa 6

Con los parámetros:

$f_0(kHz)$	Q	k
11.9	13.52	1

Cuadro 7: Parámetros de la etapa 6

3.8. Celda Fleischer-Tow

En la siguiente sección se presentan los desarrollos y análisis matemáticos mas importantes para la celda Fleischer-Tow:

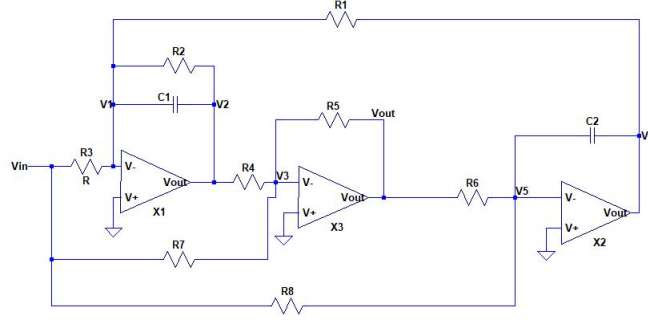


Figura 7: Celda Fleischer Tow a analizar

Se eligió dicha celda debido a sus excelentes sensibilidades (desarrolladas en la sección 4), su habilidad para trabajar con filtros con Q altos y el hecho de que tiene una salida Notch sin necesidad de agregar un sumador a la celda.

3.8.1. Función transferencia

El siguiente análisis se hará considerando amplificadores operacionales ideales, esto significa que se considera nula la corriente a la entrada de los operacionales, así como también se cumple que:

$$v_1 = v_3 = v_5 = 0V$$

En dichas condiciones, planteando las ecuaciones de nodos correspondientes se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{cases} -\frac{v_{in}}{R_3} = v_2\left(\frac{1}{R_2} + sC_1\right) + v_6\left(\frac{1}{R_1}\right) \\ -\frac{v_{in}}{R_7} = \frac{v_{out}}{R_5} + \frac{v_2}{R_4} \\ -\frac{v_{in}}{R_8} = v_6(sC_2) + v_{out}\left(\frac{1}{R_6}\right) \end{cases}$$

Dicho sistema se resolvió mediante la función linsolve del paquete sympy de Python y se llegó a la siguiente función transferencia:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = H(s) = -\frac{R_5 R_6}{R_3 R_7 R_8} \frac{s^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_3 R_4 R_8 + s C_2 R_1 R_8 (R_3 R_4 - R_2 R_7) + R_2 R_3 R_7}{s^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_4 R_6 + s C_2 R_1 R_4 R_6 + R_2 R_5} \quad (1)$$

Se puede ver fácilmente de la expresión anterior que se puede anular el término correspondiente a la primera potencia de s en el numerador, si se plantea la relación:

$$R_3 R_4 = R_2 R_7 \quad (2)$$

Entonces de (1) y (2), se tiene que la función transferencia puede reescribirse de la forma conocida de un filtro Notch como:

$$H(s) = k \frac{\left(\frac{s}{\omega_z}\right)^2 + 1}{\left(\frac{s}{\omega_p}\right)^2 + \frac{s}{\omega_p Q} + 1}$$

Donde:

$$\begin{cases} k = -\frac{R_6}{R_8} \\ \omega_z = \sqrt{\frac{R_7}{C_1 C_2 R_1 R_4 R_8}} \\ \omega_p = \sqrt{\frac{R_5}{C_1 C_2 R_1 R_4 R_6}} \\ Q = R_2 \sqrt{\frac{C_1 R_5}{C_2 R_1 R_4 R_6}} \end{cases}$$

3.8.2. Impedancia de entrada

Para el calculo de la impedancia de entrada con amplificadores operacionales ideales, se planteo que:

$$I_{in} = \frac{v_{in}}{R_3} + \frac{v_{in}}{R_7} + \frac{v_{in}}{R_8}$$

Despejando se llega a :

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = Z_{inp} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8}} = R_3 // R_7 // R_8 \quad (3)$$

Debido a que la impedancia de entrada es el paralelo de tres resistencias, si se desea lograr una celda Tow Fleischer con alta impedancia de entrada se requiere que tanto R_3 como R_7 y R_8 tomen valores altos ya que la impedancia de entrada tomara como mucho el valor de la resistencia mas pequeña de las tres. Como alternativa, debe utilizarse un buffer a la entrada para tener un alto valor de impedancia de entrada sin importar los valores de R_3 , R_7 y R_8 .

3.8.3. Impedancia de salida

4. Sensibilidades

A continuación se presenta un cuadro de las sensibilidades relativas correspondientes a los parámetros característicos del filtro Notch de segundo orden que consiste en cada una de las dos etapas del filtro:

	S_x^k	$S_x^{\omega_z}$	$S_x^{\omega_p}$	S_x^Q
R_1	0	-0.5	-0.5	-0.5
R_2	0	0	0	1
R_3	0	0	0	0
R_4	0	-0.5	-0.5	-0.5
R_5	0	0	0.5	0.5
R_6	1	0	-0.5	-0.5
R_7	0	0.5	0	0
R_8	-1	-0.5	0	0
C_1	0	-0.5	-0.5	0.5
C_2	0	-0.5	-0.5	-0.5

Cuadro 8: Sensibilidades de los parámetros del Notch

Para llegar a la transferencia de un Notch asumimos que se cumple la condición 2. Dicha condición nunca se cumplirá de forma exacta, y en dicho caso se puede encontrar que la expresión que determina el factor de calidad de los ceros del numerador es:

$$Q_z = \sqrt{\frac{C_1 R_4 R_7}{C_2 R_1 R_8}} \cdot \frac{R_2 R_3}{R_3 R_4 - R_2 R_7} \quad (4)$$

Se procedió a calcular las sensibilidades de dicho parámetro y se llegó a la siguiente tabla:

	$S_x^{Q_z}$
R_1	-0.5
R_2	$-\frac{R_3 R_4}{R_2 R_7 - R_3 R_4}$
R_3	$\frac{R_2 R_7}{R_2 R_7 - R_3 R_4}$
R_4	$\frac{R_2 R_7 + R_3 R_4}{2(R_2 R_7 - R_3 R_4)}$
R_5	0
R_6	0
R_7	$-\frac{R_2 R_7 + R_3 R_4}{2(R_2 R_7 - R_3 R_4)}$
R_8	-0.5
C_1	0.5
C_2	-0.5

Cuadro 9: Sensibilidades de Q_z

Ya que la relación clave para que el filtro sea un Notch ideal es la que esta dada en la ecuación 2, se definió el siguiente parámetro:

$$T = R_3 R_4 - R_2 R_7$$

Dado que el valor nominal de T es 0, Q_z no es derivable para dicho valor de T y se llegan a sensibilidades absurdas por lo que se realizó el análisis utilizando la definición de variabilidad relativa para un parámetro 'parasito':

$$\frac{\Delta Q_z(T=0)}{\Delta T} \cdot \frac{1}{Q(T=0)} = P S_T^{Q_z}$$

Utilizando dicha expresión se llega a que:

$$PS_T^{Q_z} = -\frac{1}{\Delta T}$$

Se puede ver de la expresión obtenida que el parámetro Q_z es altamente sensible al valor de T y que para pequeñas variaciones del mismo Q_z disminuye drásticamente. Asimismo, para los otros parámetros para los que se llegaba a un absurdo en la sensibilidad cuando se cumple la relación 2 se realizó el análisis de variabilidad semirelativa y se llegó a la siguiente tabla:

x	$PS_x^{Q_z}$
R_2	1
R_3	1
R_4	$\frac{R_4}{\Delta R_4} (\sqrt{1 + \frac{\Delta R_4}{R_4}} - 1) \approx 0,5$
R_7	$\frac{R_7}{\Delta R_7} (\sqrt{1 + \frac{\Delta R_7}{R_7}} - 1) \approx 0,5$

Cuadro 10: Tabla de variabilidades semirelativas

Para llegar a los valores numéricos de la tabla anterior se asumió que $\Delta R = \pm 0,01R$.

5. Implementacion fisica

Para la implementacion fisica de la placa se eligieron los siguientes componentes:

Etapas	$R_1(K\Omega)$	$R_2(K\Omega)$	$R_3(K\Omega)$	$R_4(K\Omega)$	$R_5(K\Omega)$	$R_6(K\Omega)$	$R_7(K\Omega)$	$R_8(K\Omega)$	$C_1(nf)$	$C_2(nf)$
Etapas 1	4.5	59.6	180	59.6	172	178	180	180	1	1
Etapas 2	4.4	54.2	180	54.2	185	178	180	180	1	1
Etapas 3	3.15	66	180	66	197	178	180	180	1	1
Etapas 4	3.3	89	180	89	161	178	180	180	1	1
Etapas 5	1.2	247	180	247	156	178	180	180	1	1
Etapas 6	1.1	190	180	190	205	178	180	180	1	1

Cuadro 11: Componentes elegidos

A continuacion se presenta una grafica de las mediciones del filtro realizado:

Figura 8: Funcion transferencia medida

6. Análisis de rango dinámico

7. Limitaciones de carga

Las limitaciones de la carga del filtro se deben principalmente a la corriente maxima que puede entregar el amplificador operacional. Para el filtro realizado se utilizo unicamente amplificadores operacionales TL084, de la datasheet del mismo se obtiene que:

8. Estabilidad

Cada etapa del filtro realizado constituye de una celda Fleischer Tow, esto significa que cada etapa es un sistema retroalimentado. Para establecer que tan estable es cada etapa se utilizaron las siguientes definiciones de margen de fase y margen de ganancia:

$$\phi_m = \phi(f_x) \quad (5)$$

$$G_m(dB) = 0 - |T(f_y)| \quad (6)$$

Donde f_x es la frecuencia en la que la ganancia de lazo es 0dB y f_y es la frecuencia en la que la ganancia llega al primer múltiplo de 360° .

Para conseguir los parámetros definidos anteriormente se simuló la ganancia de lazo para cada etapa del filtro y se realizó el diagrama de bode de dicha ganancia. Los resultados obtenidos de la simulación fueron:

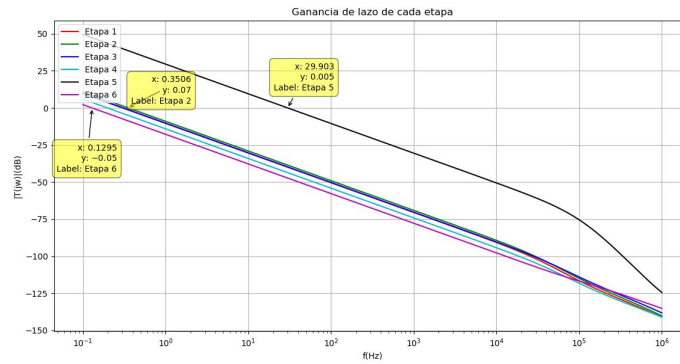


Figura 9: Ganancias de lazo superpuestas

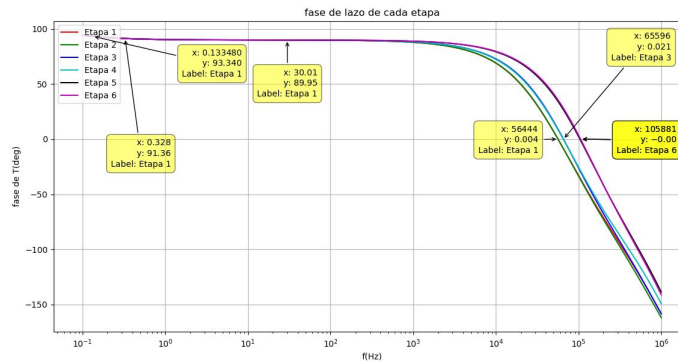


Figura 10: Fase de las ganancias de lazo

De las gráficas anteriores se obtienen los siguientes valores para los márgenes de ganancia y de fase de cada etapa:

Etapas	ϕ_m (deg)	G_m (dB)
1	91	110
2	91	110
3	91	112
4	92	115
5	90	75
6	93	120

Cuadro 12: Margenes de las distintas etapas

9. Conclusiones