

TRABAJO PRÁCTICO N°7

Trabajo Practico Final

Grupo II

AUTORES:

Pablo Martín SCHEINFELD (59065),
Santiago Agustín ARRIBERE (59169),
Matías Santiago FRANCOIS (59828),
Rafael Nicolás TROZZO (59434),
Gonzalo Joaquín DAVIDOV (59117)

PROFESORES:

Daniel Andrés JACOBY,
Carlos F. BELAUSTEGUI GOITIA,
Rodrigo Iñaki IRIBARREN

CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES

Noviembre 2019

Contenido

1. Introducción	2
2. Diseño del filtro	3
2.1. Legendre	3
2.2. Sallen Key	5
2.3. Celda Kerwin–Huelsman–Newcom	7
3. Diseño del PCB	10
4. Análisis de resultados	11
4.1. Etapas individuales	11
4.2. Etapas acumuladas	13
4.3. Circuito cargado	15
5. Conclusión	17

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es diseñar un filtro que cumpla una plantilla especificada correspondiente a un filtro pasa-bajos (tabla 1). Con este fin se utiliza la aproximación de Legendre para obtener la transferencia deseada, luego se separa en etapas de segundo orden y se eligen las celdas apropiadas para la implementación de cada etapa, de esta manera en base a los diferentes parámetros de cada etapa se decidió qué celdas utilizar.

Parámetro	Valor
f_p	10kHz
f_a	12kHz
A_p	1dB
A_a	45dB
RD	45dB

TABLA 1: Plantilla del filtro

2. Diseño del filtro

2.1. Legendre

Como se propuso para el desarrollo del filtro se utilizó la aproximación de Legendre para el cálculo de los polos necesarios para la implementación del filtro pasa-bajos. Esta aproximación garantiza la máxima planicidad en la banda de paso. Utilizando el [programa de diseño de filtros activos](#) previamente desarrollado, inicialmente se optó por tomar las especificaciones de la plantilla sin proponer restricciones, con lo que se obtuvo que el orden mínimo del filtro debía ser 14. Debido al elevado orden del filtro y los elevados Q que se obtuvieron para cada etapa, se propusieron restricciones en la banda de paso y en la banda atenuada con el fin de contemplar posibles errores en los valores de los componentes y en las sensibilidades de las celdas utilizadas.

Parámetro	Valor
f_p	10kHz
f_a	12kHz
A_p	0.5dB
A_a	50dB
RD	45dB

TABLA 2: Plantilla restringida del filtro

De esta forma tomando la plantilla propuesta en la tabla 2, utilizando el software mencionado previamente se obtuvo un filtro de orden 16 con el diagrama de polos y ceros expuesto en la figura 1.

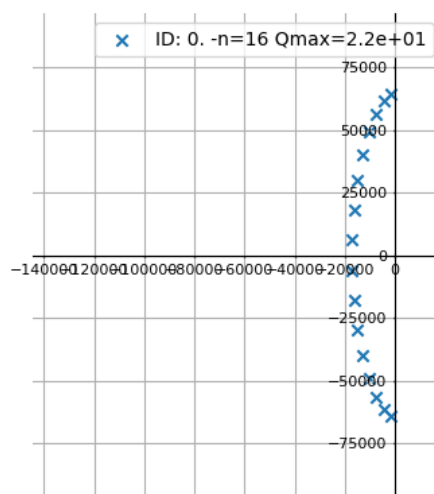


FIGURA 1: Polos y ceros del calculado teóricamente

Posteriormente se continuó con el diseño del filtro separando el sistema en 8 etapas de segundo

orden, agrupando los polos conjugados en cada una de las etapas. Con el fin de maximizar el rango dinámico se ordenaron las etapas con Q creciente y de esta forma se obtuvieron las especificaciones de frecuencia central y factor de calidad para cada etapa como se muestra en la tabla 3.

Etapas	Q	f_0 [Hz]
1	0.53	2973
2	0.73	3911
3	1.08	5267
4	1.58	6657
5	2.34	7913
6	3.65	8945
7	6.62	9689
8	20.69	10090

TABLA 3: Especificaciones de cada etapa

Con estos datos es posible obtener la transferencia de cada etapa, sabiendo que todas ellas corresponden a filtros pasa-bajos, los cuales se caracterizan según la ecuación 1.

$$H(s) = \frac{w_o^2}{s^2 + \frac{w_o^2}{q} \cdot s + w_o^2} \quad (1)$$

Para terminar de apreciar el comportamiento de cada etapa se graficaron superpuestos en la figura 2

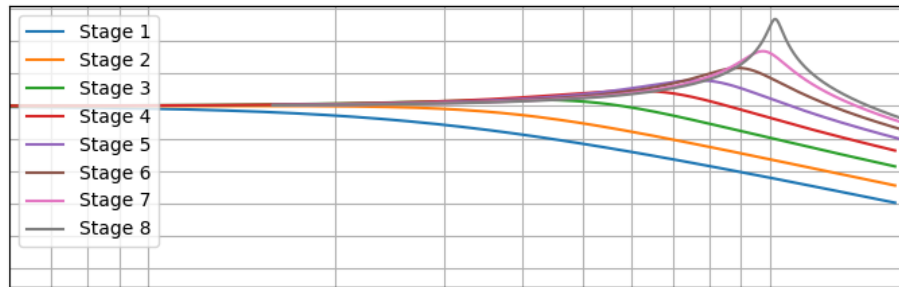


FIGURA 2: Superposición de la transferencia de cada etapa

De esta forma es posible observar que las últimas etapas que presentan un factor de calidad mayor, son las que presentan los mayores sobrepicos, que en combinación con la gran atenuación que generan las primeras etapas en las inmediaciones de la frecuencia de corte, se obtiene una gran planitud en la banda de paso junto con una pronunciada caída en la banda de transición.

2.2. Sallen Key

Para el diseño del filtro se utilizaron celdas Sallen Key para las primeras etapas del mismo, estas son las de menor Q, se decidió por utilizar estas celdas debido a su baja cantidad de componentes, sencillez y buenas características como fidelidad y sensibilidades al trabajar con factores de calidad pequeños.

El circuito correspondiente a una celda Sallen Key se puede ver a continuación en la figura 3

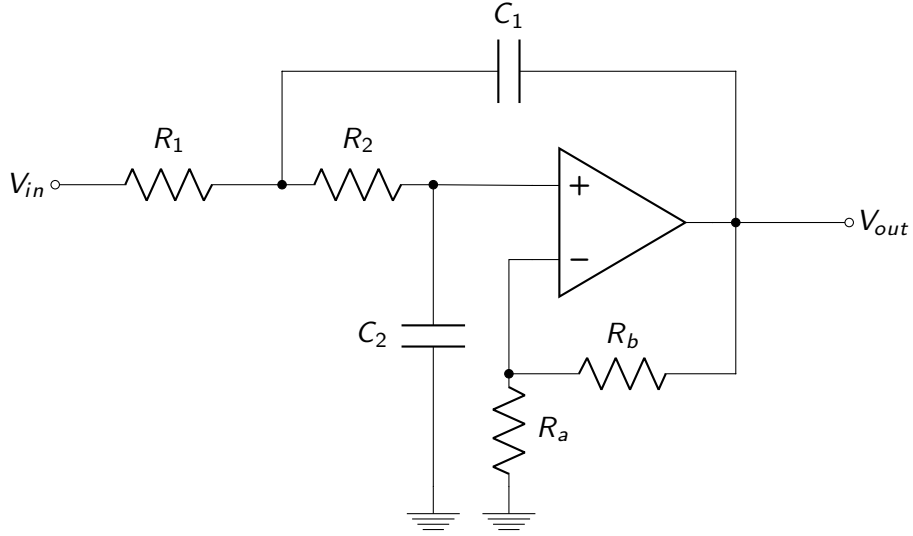


FIGURA 3: Celda Sallen-Key pasabajos de segundo orden

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s(R_1 C_1(1 - k) + C_2(R_1 + R_2)) + 1} \quad (2)$$

En donde $K = 1 + \frac{R_b}{R_a}$.

De la función transferencia se obtienen las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} \frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} + (1 - k) \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ G = 1 + \frac{R_b}{R_a} \end{cases} \quad (3)$$

Con la finalidad de elegir una configuración que presente ganancia unitaria, se toma a R_a como un circuito abierto y a R_b como un circuito cerrado. De esta forma, las expresiones halladas previamente se reducen a:

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s C_2 (R_1 + R_2) + 1} \quad (4)$$

De donde se encuentra que:

$$\begin{cases} \frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ G = 1 \end{cases} \quad (5)$$

2.2.1. Sensibilidades

Previo a el armado del circuito y la selección de los valores de cada componente, es de especial interés analizar las sensibilidades del mismo. Las sensibilidades se calculan como se indica en la ecuación 6.

$$S_k^h = \frac{k}{h} \frac{dh}{dk} \quad (6)$$

Utilizando las Ecuaciones 5 es fácil notar que las variaciones del parámetro G con respecto a cualquier variación en los componentes serán siempre 0. Mientras que para ω_0 y Q se tabulan las siguientes ecuaciones y valores en la tabla 4 a continuación:

Sensibilidades	R_1	R_2	C_1	C_2
ω_0	-1/2	-1/2	-1/2	-1/2
Q	$-\frac{(R_1-R_2)}{2(R_1+R_2)}$	$\frac{(R_1-R_2)}{2(R_1+R_2)}$	1/2	1/2

TABLA 4: Sensibilidades de los parámetros característicos de la celda Sallen Key.

2.2.2. Selección de los valores

Para la selección de los valores de cada componente se realizó la separación por etapas según lo encontrado en el apartado referido al uso de Legendre como aproximación, así los valores que se decidieron utilizar en cada celda se pueden ver a continuación en las siguientes tablas, los mismos fueron encontrados en base a los valores de ω_0 y de Q necesarios para cada etapa en base a las ecuaciones que se hallaron para esta celda en el apartado anterior. Los valores de componentes elegidos para cada etapa se muestran en la Tabla 5

Etapas	C_1	C_2	R_1, R_2
1	1,35nF	1,2nF	43kΩ
2	12nF	5,6nF	5,1kΩ
3	22nF	4,7nF	3kΩ
4	10nF	1nF	7,5kΩ
5	22nF	1nF	4,3kΩ
6	363nF	6,8nF	360Ω

TABLA 5: Componentes de etapas Sallen-Key

2.3. Celda Kerwin–Huelsman–Newcom

Se decidió por utilizar una celda universal de este tipo para las ultimas dos etapas debido a que son aquellas que presentan el factor de calidad mas grande y por lo tanto se hace inviable realizarlos con sellen key. Esta celda fue creada por Kerwin, Huelsman y Newcom en el año 1967, la misma se muestra a continuación en la figura 4.

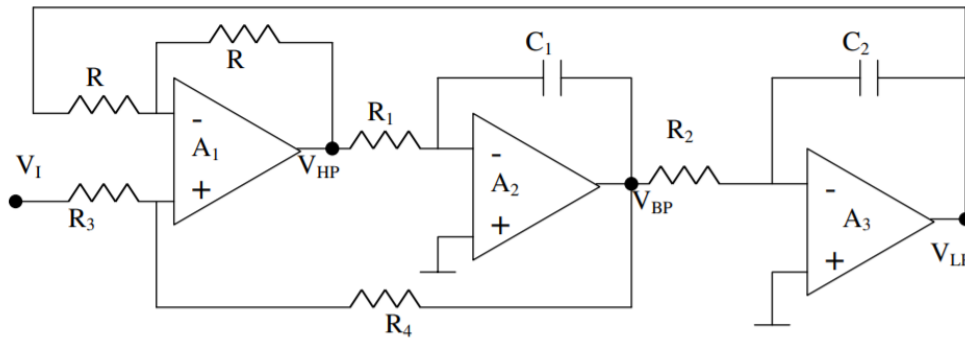


FIGURA 4: Circuito característico de la celda universal de Kerwin-Huelsman-Newcom

De esta manera el diagrama de bloques del circuito quedará determinado de la forma del diagrama de la figura 5.

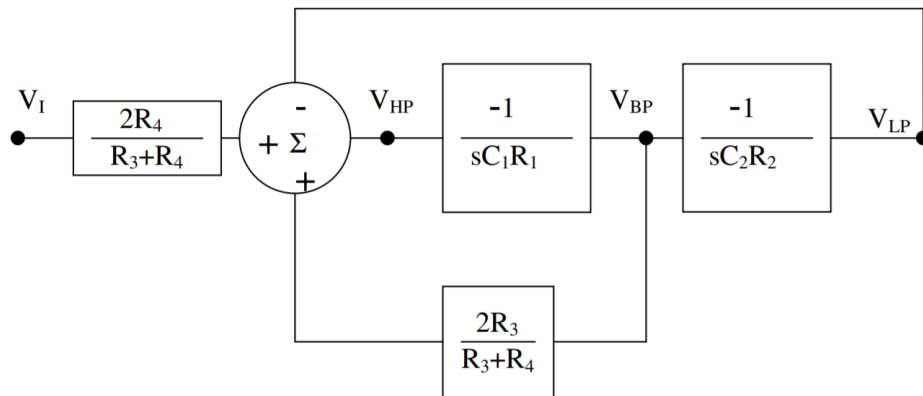


FIGURA 5: Diagramas de bloques del circuito.

De esta manera se pueden encontrar las ecuaciones correspondientes a las tres salidas posibles del

filtro, las mismas quedarían de la forma de las ecuaciones 7.

$$\begin{aligned}\frac{V_{HP}}{V_{Inp}} &= \frac{G \cdot s^2}{s^2 + \left(\frac{w_p}{Q}\right) \cdot s + w_p^2} \\ \frac{V_{LP}}{V_{Inp}} &= \frac{G \cdot w_p^2}{s^2 + \left(\frac{w_p}{Q}\right) \cdot s + w_p^2} \\ \frac{V_{BP}}{V_{Inp}} &= \frac{-G \cdot w_p \cdot s}{s^2 + \left(\frac{w_p}{Q}\right) \cdot s + w_p^2}\end{aligned}\quad (7)$$

En dichas ecuaciones se han de reemplazar los parámetros G , w_p y Q por los siguientes, para hallar la transferencia en base a los valores de los componentes utilizados:

$$\begin{aligned}G &= \frac{2R_4}{R_3 + R_4} \\ w_p &= \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ Q &= \frac{R_3 + R_4}{2R_3}\end{aligned}\quad (8)$$

Debido a que para realizar el filtro solicitado solo se necesita la salida V_{LP} es decir la correspondiente a un pasa bajos, se trabajará con ella de aquí en adelante.

Así, una vez encontrada la función transferencia y los parámetros de diseño del filtro es decir la w_p , G y Q , entonces se procede a continuación a calcular las sensibilidades del sistema.

2.3.1. Sensibilidades

Siguiendo el caso del análisis realizado para la celda anterior se realiza a continuación la tabla 6 en donde se muestra la sensibilidad de cada parámetro (G , Q , w_p) en función de los valores de los componentes utilizados. Cabe destacar que ninguno de estos parámetros depende de las resistencias de realimentación de valor R , por lo que no se incluye a las mismas en la tabla.

Sensibilidades	R_1	R_2	R_3	R_4	C_1	C_2
G	0	0	$\frac{R_3}{R_3+R_4}$	$\frac{R_3}{R_3+R_4}$	0	0
w_p	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
Q	0	0	$\frac{R_4}{R_3+R_4}$	$\frac{R_4}{R_3+R_4}$	0	0

TABLA 6: Sensibilidades de los parámetros característicos de la celda KHN.

2.3.2. Selección de los valores

Para la selección de los valores de cada componente se realizó la separación por etapas de la misma forma que en el caso anterior, así los valores que se decidieron utilizar en cada celda se pueden ver a continuación en las siguientes tablas, los mismos fueron encontrados en base a los valores de w_p

y de Q necesarios para cada etapa en base a las ecuaciones que se hallaron para esta celda en el apartado anterior.

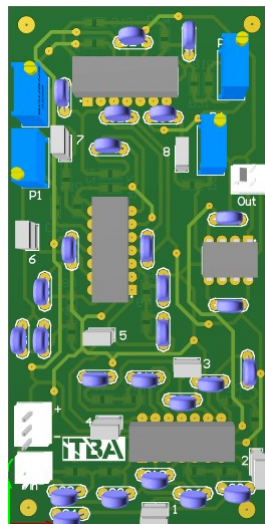
KHN					
Celda	$C_1 = C_2$ [F]	R [Ω]	$R_1 = R_2$ [Ω]	R_3 [Ω]	R_4 [Ω]
7	8n2	12k	2k	2k2	33k
8	1n8	180k	8k76	6k8	330k

TABLA 7: Componentes de etapas KHN

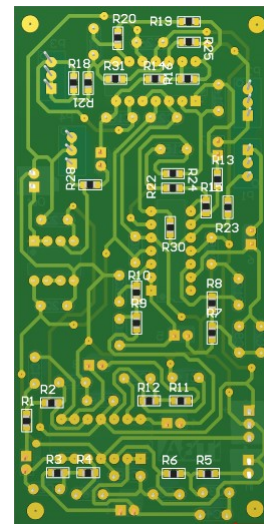
3. Diseño del PCB

Con el fin de reducir los errores se utilizaron resistencias SMD con tolerancias del 1 %, y se buscaron capacitores que cumplan con una tolerancia del 5 % con el mismo fin de reducir los errores inducidos por las tolerancias de los componentes.

Además se incluyeron 4 presets, uno en la etapa de atenuación a la salida, luego en la ultima celda que presentó un factor de calidad muy elevado se utilizaron dos presets con el fin de corregir posibles desviaciones tanto del mismo factor de calidad como de la frecuencia de corte de la misma, y por ultimo se incluyo un preset en la ante ultima celda para corregir su factor de calidad ya que el mismo también era de un valor elevado.



(A) Vista superior



(B) Vista inferior

FIGURA 6: Diseño del PCB

4. Análisis de resultados

La respuesta en frecuencia del filtro se muestra en la Figura 7. Se puede observar que se cumple la plantilla dada.

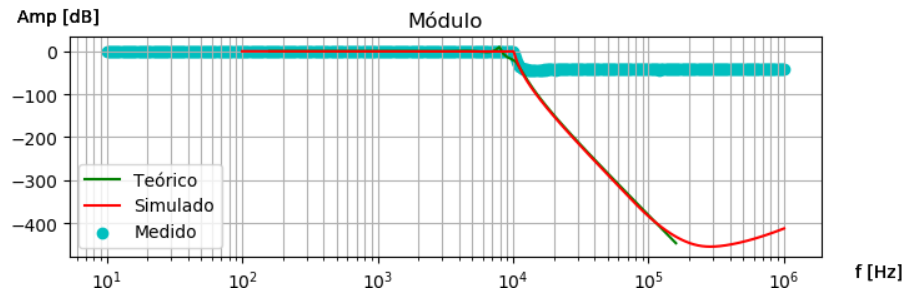


FIGURA 7: Contrastación del filtro entero

A continuación se muestran las mediciones realizadas para cada etapa por separado y la acumulada de cada etapa conectada a las anteriores.

4.1. Etapas individuales

En la Figuras 8 a 15 se muestra la contrastación de la transferencia de cada etapa, teórica, simulada y medida. En ningún caso se pudo medir con precisión menos de -20dB, por lo que las mediciones por debajo de ese rango no fueron realizables. Por esto, ninguna de las curvas medidas es válida luego de los -20dB.

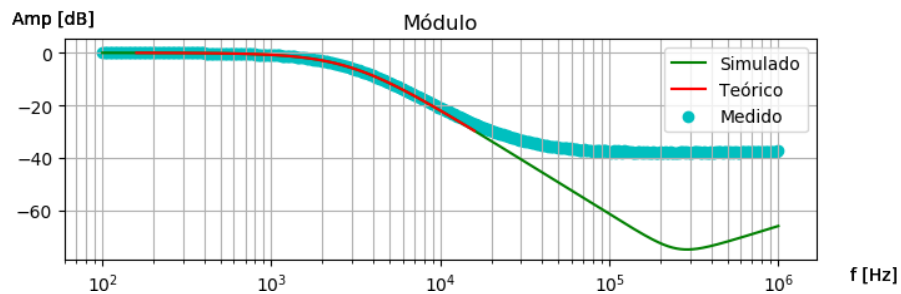


FIGURA 8: Contrastación de la etapa 1

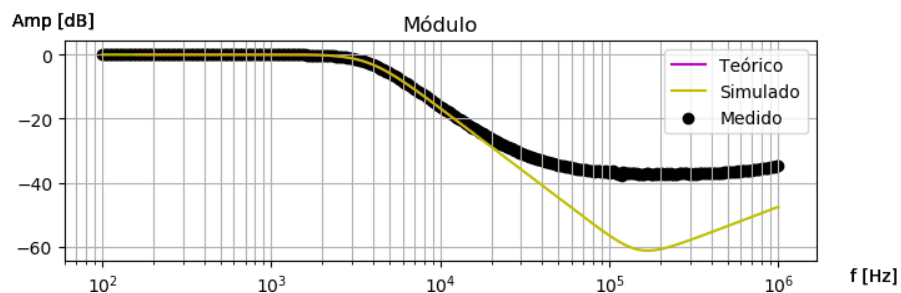


FIGURA 9: Contrastación de la etapa 2

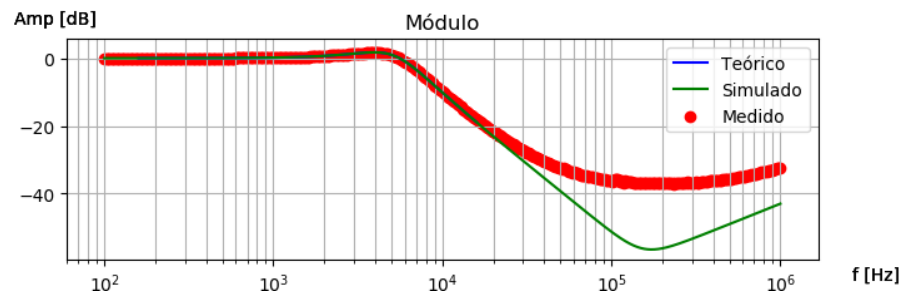


FIGURA 10: Contrastación de la etapa 3

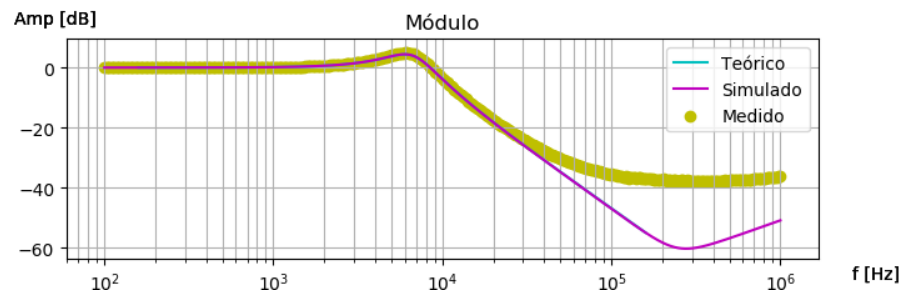


FIGURA 11: Contrastación de la etapa 4

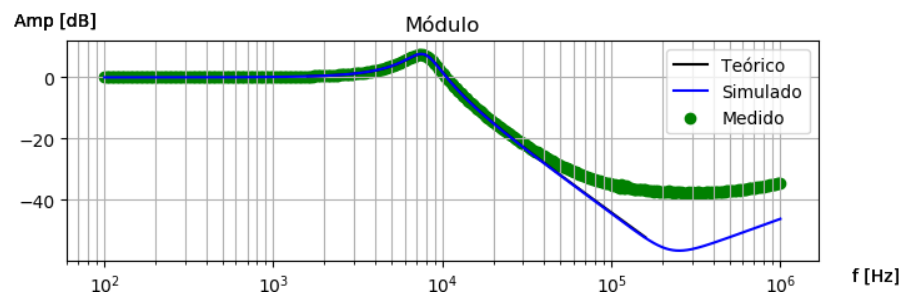


FIGURA 12: Contrastación de la etapa 5

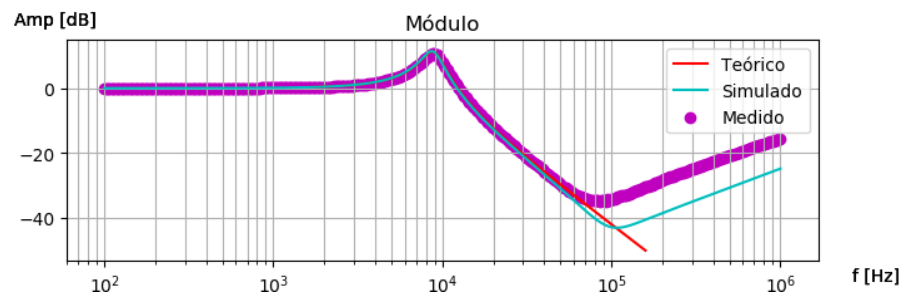


FIGURA 13: Contrastación de la etapa 6

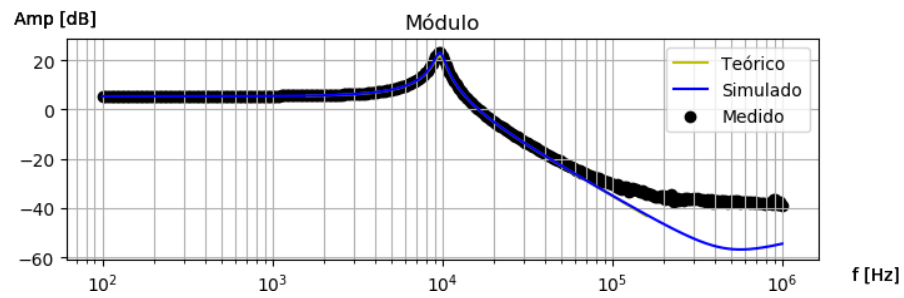


FIGURA 14: Contrastación de la etapa 7

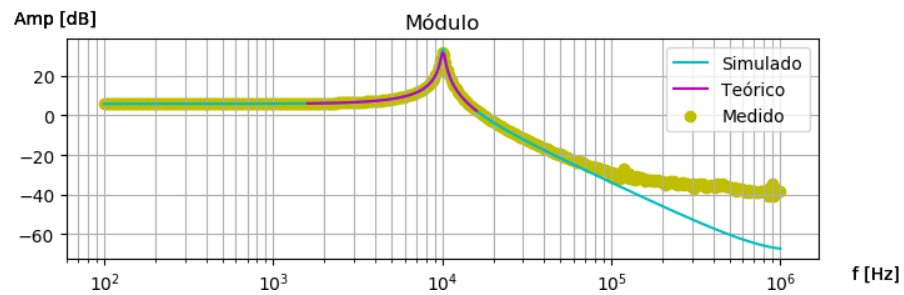


FIGURA 15: Contrastación de la etapa 8

4.2. Etapas acumuladas

En las Figuras 16 a 23 se muestra la superposición de las curvas acumuladas medidas con la teórica y la práctica.

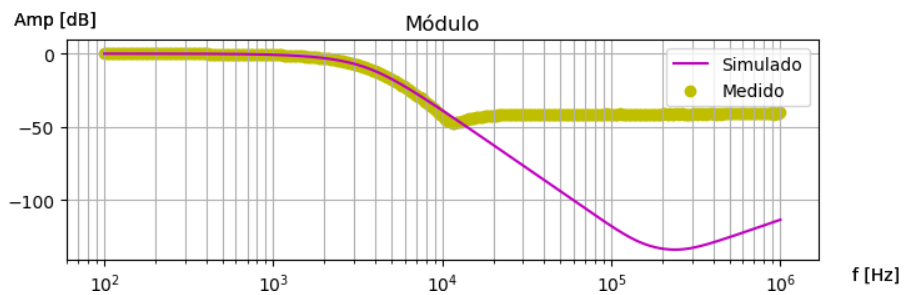


FIGURA 16: Contrastación de la etapa 2 acumulada

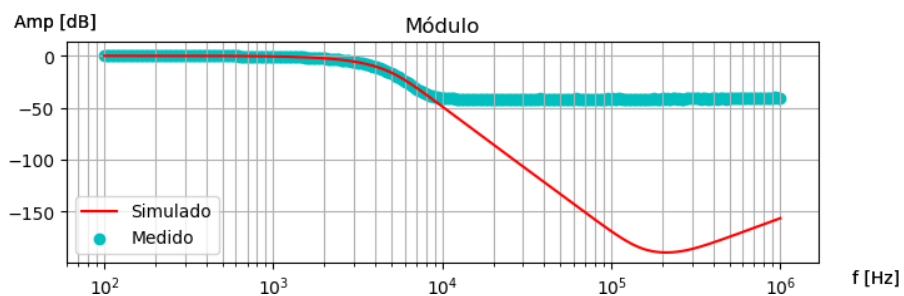


FIGURA 17: Contrastación de la etapa 3 acumulada

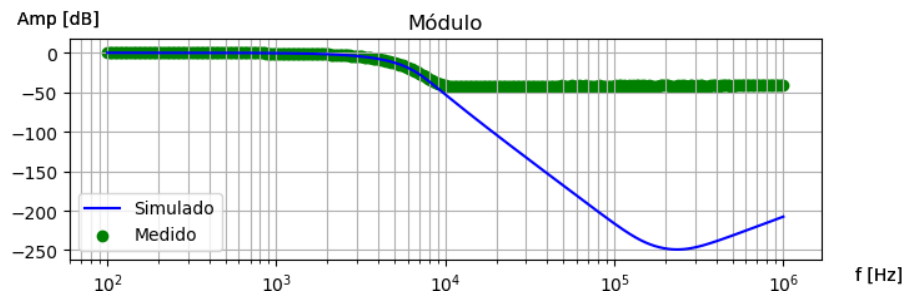


FIGURA 18: Contrastación de la etapa 4 acumulada

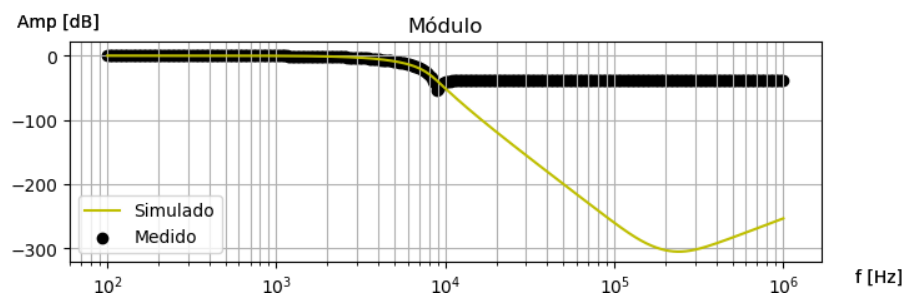


FIGURA 19: Contrastación de la etapa 5 acumulada

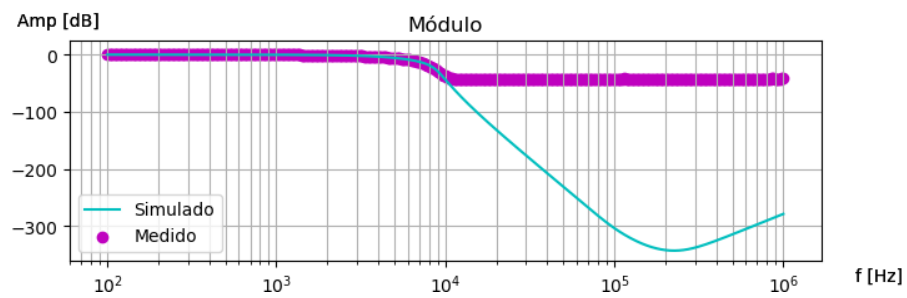


FIGURA 20: Contrastación de la etapa 6 acumulada

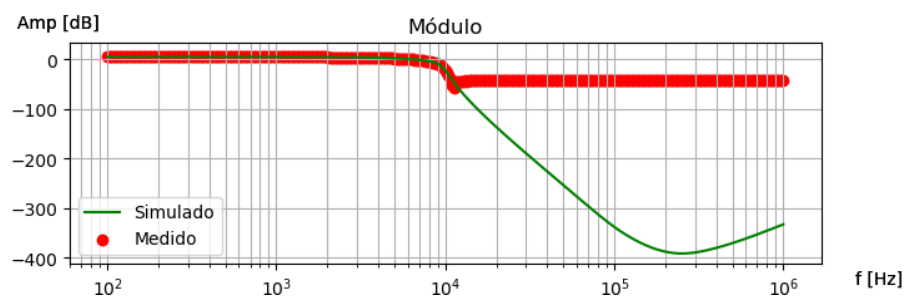


FIGURA 21: Contrastación de la etapa 7 acumulada

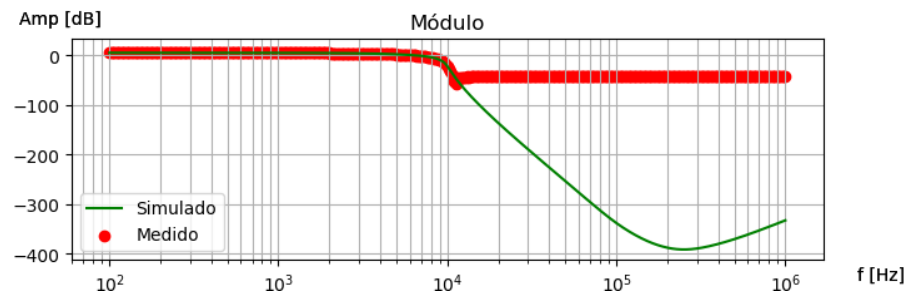


FIGURA 22: Contrastación de la etapa 7 acumulada

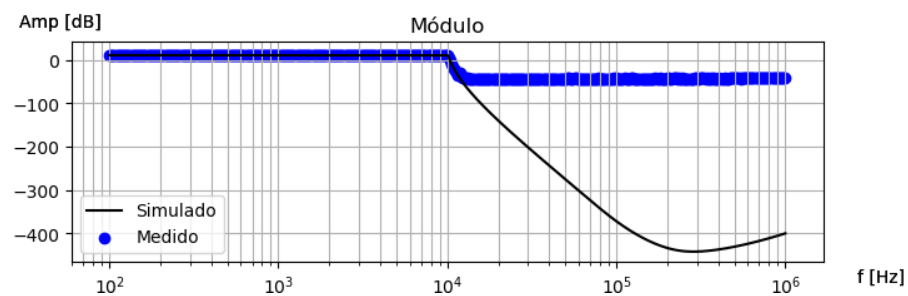


FIGURA 23: Contrastación de la etapa 8 acumulada

4.3. Circuito cargado

Como se tiene un amplificador operacional a la salida actuando como buffer, la máxima carga del circuito viene dada por éste componente. La máxima corriente que puede entregar depende de la tensión de salida y viene dada por el gráfico de la Figura 24.

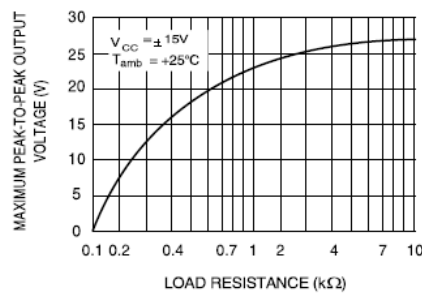
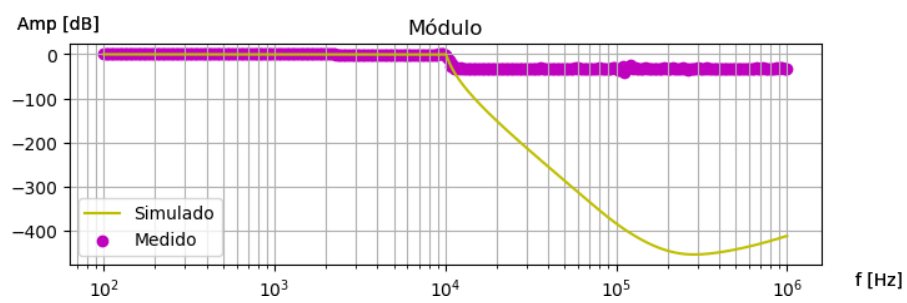


FIGURA 24: Máxima carga del TL082

En la Figura 25 se muestra la respuesta en frecuencia del sistema cargado con una resistencia de $2,7k\Omega$, para una salida de $2V_{pp}$. Se puede observar que se sigue comportando de la misma forma.

FIGURA 25: Circuito cargado con $R=2,7k\Omega$

5. Conclusión

En éste trabajo se pudo completar el objetivo de diseñar un filtro de orden superior para que cumpla una plantilla dada. Resultó de vital importancia a la hora del diseño el tomar un margen para las frecuencias de corte y ganancias en bandas de paso y atenuada, y la correcta elección de la celda para la implementación de cada etapa. Se utilizaron celdas Sallen-Key mientras el valor de Q fuera suficientemente bajo, para tener la menor cantidad de componentes posible. Para las etapas de mayor Q se utilizó la celda KHN, que permitió ajustar los parámetros de la forma buscada.