

Instituto Tecnológico de Buenos Aires

22.01 TEORÍA DE CIRCUITOS

Trabajo práctico N°6

Grupo 3

MECHOULAM, Alan	58438
LAMBERTUCCI, Guido Enrique	58009
RODRIGUEZ TURCO, Martín Sebastian	56629
LONDERO BONAPARTE, Tomás Guillermo	58150
GALDEMAN, Agustín	59827

Profesores

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

Presentado: 21/11/19

Índice

1. Introducción	2
2. Elaboración del filtro	2
2.1. Celda universal Fleischer-Tow (FT)	2
2.2. Análisis de sensibilidades	4
3. Selección de componentes	5
3.1. Confección del circuito	5
3.2. Rango dinámico	9
3.3. Máxima carga	10
3.4. Ganancia de lazo	10

1. Introducción

En este informe se presenta y se explica como se confeccionó el filtro final propuesto por la cátedra. Para este, se valió del uso de las aproximaciones y celdas estudiadas a lo largo de la materia, para luego poder satisfacer la plantilla establecida.

2. Elaboración del filtro

Dado que el filtro debe ser un rechaza banda, con aproximación de Chebycheff Inverso, se buscó que este cumpla con las siguientes restricciones:

Variable	Valor
f_p^-	11.712 kHz
f_a^-	13.802kHz
f_a^+	16.301kHz
f_p^+	19.211kHz
A_a	45dB
A_p	1dB
k	$\frac{1}{3}$

Tabla 1: Características del filtro realizado.

Para ello, se decidió emplear celdas del tipo universal, más específicamente del tipo Fleischer-Tow. Es por ello que se analiza y se explica la selección de dicha celda a continuación.

2.1. Celda universal Fleischer-Tow (FT)

En ocasiones es deseable poseer una señal de entrada que alimente varios nodos, obteniendo una única salida. A continuación se presenta la celda Fleischer-Tow, la cual se caracteriza por poder presentar una única transferencia que, dependiendo de los componentes seleccionados, puede ser un pasa bajos, pasa altos, pasa todo, de banda pasante y rechaza banda¹, lo cual es una fuerte ventaja frente a los otros tipos de celdas universales, las cuales requieren más de tres operacionales para conseguir dichas salidas.

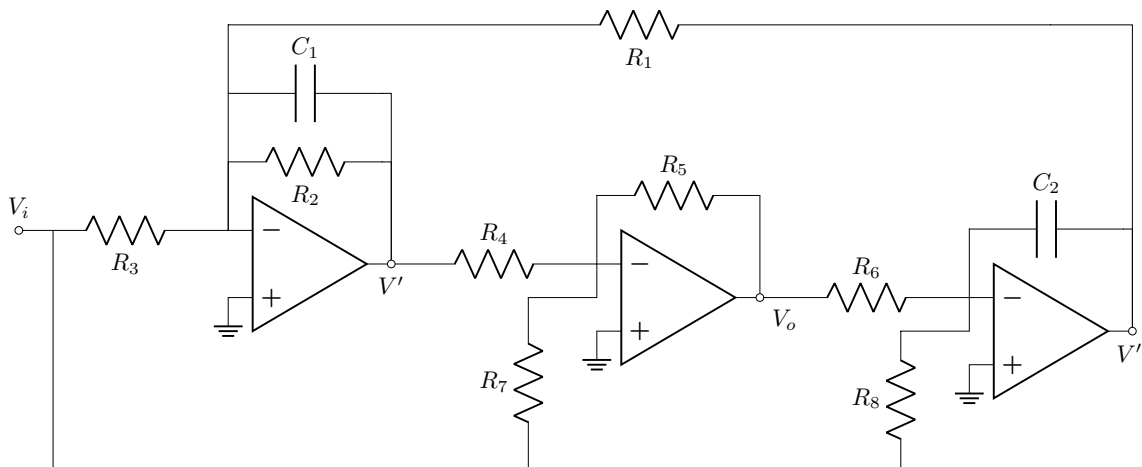


Figura 1: Circuito de la celda Universal Fleischer-Tow.

Se analiza el circuito presentado para poder obtener la transferencia de este. Para calcular la función mencionada de esta celda, se observa primero la siguiente configuración:

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

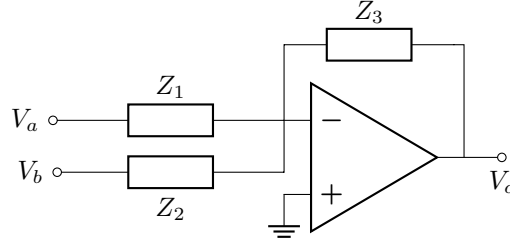


Figura 2: Circuito genérico inversor.

Observando la Figura (2), aplicando el teorema de superposición, se presenta una configuración inversora, por lo que se obtiene

$$V_c = -\frac{V_a}{\frac{Z_1}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_3 A_o} + \frac{1}{A_o}} - \frac{V_b}{\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_2}{Z_3 A_o} + \frac{1}{A_o}} \quad (1)$$

Aplicando (1) y considerando los tres operacionales de la Figura (1) iguales, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} V' &= -V_i A - V'' B \\ V_o &= -V' C - V_i D \\ V'' &= -V_o E - V_i F \end{aligned} \quad (2)$$

siendo las constantes empleadas las siguientes:

$$\begin{aligned} A^{-1} &= \frac{R_3}{R_2 // \frac{1}{sC_1}} + \frac{R_3}{\left(R_2 // \frac{1}{sC_1}\right) A_o} + \frac{1}{A_o} \\ B^{-1} &= \frac{R_1}{R_2 // \frac{1}{sC_1}} + \frac{R_1}{\left(R_2 // \frac{1}{sC_1}\right) A_o} + \frac{1}{A_o} \\ C^{-1} &= \frac{R_4}{R_5} + \frac{R_4}{R_5 A_o} + \frac{1}{A_o} \\ D^{-1} &= \frac{R_7}{R_5} + \frac{R_7}{R_5 A_o} + \frac{1}{A_o} \\ E^{-1} &= sC_2 R_6 + \frac{sC_2 R_6}{A_o} + \frac{1}{A_o} \\ F^{-1} &= sC_2 R_8 + \frac{sC_2 R_8}{A_o} + \frac{1}{A_o} \end{aligned} \quad (3)$$

Operando algebraicamente, se obtiene que la transferencia de esta configuración es

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{AC - BCF - D}{1 + BCE} \quad (4)$$

Si se consideran ideales los operacionales, es decir, se toma $A_o \rightarrow \infty$, se obtiene que la forma de la transferencia final es

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_6}{R_8} \frac{s^2 \frac{C_1 C_2 R_1 R_8 R_4}{R_7} + s \frac{C_2 R_1 R_8 R_4}{R_2} \left(\frac{1}{R_7} - \frac{R_2}{R_3 R_4} \right) + 1}{s^2 \frac{C_1 C_2 R_6 R_1 R_4}{R_5} + s \frac{C_2 R_6 R_1 R_4}{R_2 R_5} + 1} \quad (5)$$

Es de interés obtener de esta los factores ω_o y Q de los polos, siendo estos los presentados a continuación.

$$\begin{aligned} \omega_o &= \sqrt{\frac{R_5}{R_6 R_1 R_4 C_1 C_2}} \\ Q &= R_2 \sqrt{\frac{C_1 R_5}{C_2 R_6 R_1 R_4}} \end{aligned} \quad (6)$$

Es así que se destaca la dependencia de ω_o y Q de los capacitores, mientras que resultan ser independientes de R_8 . Además, resulta de interés que la frecuencia del polo es independiente de la resistencia R_2 , mientras que Q no, lo que permite modificar la primer variable sin afectar a la segunda.

2.2. Análisis de sensibilidades

En la siguiente sección, se procede a calcular las sensibilidades de $H(s)$, Q y ω_o con respecto de cada componente, definiéndose la sensibilidad de una función y con respecto de x de la forma:

$$S_x^y = \frac{\delta y}{\delta x} \frac{x}{y}$$

Primero, se presentan las sensibilidades de $H(s)$:

$$S_{R_2}^H = - \frac{s [sC_2 R_6 R_1 R_8 R_7 + R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5)] C_2 R_2 R_1 R_4}{[R_2 R_5 + R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_6] [sR_1 R_8 (C_1 R_2 R_3 R_4 s - R_2 R_7 + R_3 R_4) C_2 + R_2 R_3 R_7]} \quad (7)$$

$$S_{R_6}^H = \frac{R_2 R_5}{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_6} \left[\frac{R_2 R_5}{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_6} + 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$S_{R_1}^H = \frac{\{[sC_1 R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5) R_4 - R_5 R_8 R_7] R_2 + R_4 R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5)\} sC_2 R_2 R_1}{[(C_1 C_2 R_6 R_1 R_4 s^2 + R_5) R_2 + R_1 R_4 sC_2 R_6] \{[s^2 R_4 C_1 C_2 R_1 R_3 R_8 - R_7 (C_2 R_1 R_8 s - R_3)] R_2 + R_1 R_4 sC_2 R_8 R_3\}} \quad (9)$$

$$S_{R_3}^H = - \frac{R_2 R_5}{R_3 (C_1 R_2 s + 1) R_4} \left[- \frac{R_2 R_5}{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_8} + \frac{R_2 R_5}{R_3 (C_1 R_2 s + 1) R_4} - \frac{R_5}{R_7} \right]^{-1} \quad (10)$$

$$S_{R_8}^H = \frac{R_2 R_5}{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_8} \left[- \frac{R_2 R_5}{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_8} + \frac{R_2 R_5}{R_3 (C_1 R_2 s + 1) R_4} - \frac{R_5}{R_7} \right]^{-1} \quad (11)$$

$$S_{R_7}^H = \frac{R_5}{R_7} \left[- \frac{R_2 R_5}{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_8} + \frac{R_2 R_5}{R_3 (C_1 R_2 s + 1) R_4} - \frac{R_5}{R_7} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$S_{R_4}^H = \frac{s (C_1 R_2 s + 1) [sC_2 R_6 R_1 R_8 R_7 + R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5)] C_2 R_2 R_1 R_4}{(C_1 C_2 R_2 R_6 R_1 R_4 s^2 + R_1 R_4 sC_2 R_6 + R_2 R_5) [s^2 R_4 C_1 C_2 R_2 R_1 R_3 R_8 + C_2 R_1 R_8 (-R_2 R_7 + R_3 R_4) s + R_2 R_3 R_7]} \quad (13)$$

$$S_{R_5}^H = \frac{R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_6}{R_2 R_5 + R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_6} \quad (14)$$

$$S_{C_1}^H = \frac{C_1 s^2 [sC_2 R_6 R_1 R_8 R_7 + R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5)] C_2 R_2^2 R_1 R_4}{[R_2 R_5 + R_1 (C_1 R_2 s + 1) R_4 sC_2 R_6] [sR_1 R_8 (C_1 R_2 R_3 R_4 s - R_2 R_7 + R_3 R_4) C_2 + R_2 R_3 R_7]} \quad (15)$$

$$S_{C_2}^H = \frac{\{[sC_1 R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5) R_4 - R_5 R_8 R_7] R_2 + R_4 R_3 (-R_6 R_7 + R_8 R_5)\} sC_2 R_2 R_1}{[(C_1 C_2 R_6 R_1 R_4 s^2 + R_5) R_2 + R_1 R_4 sC_2 R_6] \{[s^2 R_4 C_1 C_2 R_1 R_3 R_8 - R_7 (C_2 R_1 R_8 s - R_3)] R_2 + R_1 R_4 sC_2 R_8 R_3\}} \quad (16)$$

Luego, dado que la sensibilidades de ω_o y Q resultan constantes, independientemente del componente del cual se las calcula, se presenta dichos valores de interés en la siguiente tabla.

	R₂	R₆	R₁	R₃	R₈	R₇	R₄	R₅	C₁	C₂
ω_o	0	-0.5	-0.5	0	0	0	-0.5	0.5	-0.5	-0.5
Q	1	-0.5	-0.5	0	0	0	-0.5	0.5	0.5	-0.5

Tabla 2: Sensibilidades de ω_o y Q con respecto de cada componente

3. Selección de componentes

A continuación se presentan los componentes seleccionados para cada etapa.

Componente	Valor	Composición
R_1	33.68 $k\Omega$	680 $k\Omega$ + 33 $k\Omega$
R_2	334.28 $k\Omega$	3.9 $k\Omega$ + 330 $k\Omega$
R_3	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_4	334.28 $k\Omega$	3.9 $k\Omega$ + 330 $k\Omega$
R_5	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_6	49.7 $k\Omega$	2.7 $k\Omega$ + 47 $k\Omega$
R_7	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_8	50 $k\Omega$	47 $k\Omega$ + 3 $k\Omega$
C_1	95 pf	68 pf // 27 pf
C_2	95 pf	68 pf // 27 pf

Tabla 3: Componentes seleccionados de la primer etapa.

Componente	Valor	Composición
R_1	27.03	27+27 $k\Omega$
R_2	371.57 $k\Omega$	680 $k\Omega$ // 820 $k\Omega$
R_3	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_4	371.57 $k\Omega$	680 $k\Omega$ // 820 $k\Omega$
R_5	52.5 $k\Omega$	56 $k\Omega$ // 820 $k\Omega$
R_6	49.77 $k\Omega$	2.7 $k\Omega$ + 47 $k\Omega$
R_7	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_8	47.5 $k\Omega$	47 $k\Omega$ + 500 $k\Omega$
C_1	100 pf	100 pf
C_2	100 pf	100 pf

Tabla 4: Componentes seleccionados de la segunda etapa.

Componente	Valor	Composición
R_1	27.13	120+27 $k\Omega$
R_2	465.31 $k\Omega$	680 $k\Omega$ // 1.5 $M\Omega$
R_3	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_4	465.31 $k\Omega$	680 $k\Omega$ // 1.5 $M\Omega$
R_5	42.08 $k\Omega$	15 $k\Omega$ + 27 $k\Omega$
R_6	49.77 $k\Omega$	2.7 $k\Omega$ + 47 $k\Omega$
R_7	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_8	48 $k\Omega$	47 $k\Omega$ + 1 $k\Omega$
C_1	100 pf	100 pf
C_2	100 pf	100 pf

Tabla 5: Componentes seleccionados de la tercer etapa.

Componente	Valor	Composición
R_1	10.29 $k\Omega$	4.7 $k\Omega$ + 5.6 $k\Omega$
R_2	1.32 $M\Omega$	120 $k\Omega$ + 1.2 $M\Omega$
R_3	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_4	1.32 $M\Omega$	120 $k\Omega$ + 1.2 $M\Omega$
R_5	39.44 $k\Omega$	470 $k\Omega$ + 39 $k\Omega$
R_6	49.77 $k\Omega$	2.7 $k\Omega$ + 47 $k\Omega$
R_7	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_8	48 $k\Omega$	47 $k\Omega$ + 1 $k\Omega$
C_1	92 pf	10 pf // 82 pf
C_2	92 pf	10 pf // 82 pf

Tabla 6: Componentes seleccionados de la cuarta etapa.

Componente	Valor	Composición
R_1	10.19 $k\Omega$	12 $k\Omega$ // 68 $k\Omega$
R_2	918.2 $k\Omega$	100 $k\Omega$ + 820 $k\Omega$
R_3	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_4	918.2 $k\Omega$	100 $k\Omega$ + 820 $k\Omega$
R_5	56 $k\Omega$	56 $k\Omega$
R_6	49.77 $k\Omega$	2.7 $k\Omega$ + 47 $k\Omega$
R_7	45 $k\Omega$	43 $k\Omega$ + 2 $k\Omega$
R_8	55 $k\Omega$	12 $k\Omega$ + 43 $k\Omega$
C_1	88 pf	82 pf // 5.6 pf
C_2	88 pf	82 pf // 5.6 pf

Tabla 7: Componentes seleccionados de la quinta etapa.

Componente	Valor	Composición
R_1	27.13 $k\Omega$	120 $k\Omega$ + 27 $k\Omega$
R_2	465.31 $k\Omega$	680 $k\Omega$ // 1.5 $M\Omega$
R_3	47 $k\Omega$	47 $k\Omega$
R_4	465.31 $k\Omega$	680 $k\Omega$ // 1.5 $M\Omega$
R_5	42.08 $k\Omega$	15 $k\Omega$ + 27 $k\Omega$
R_6	49.77 $k\Omega$	2.7 $k\Omega$ + 47 $k\Omega$
R_7	46 $k\Omega$	43 $k\Omega$ + 3 $k\Omega$
R_8	53 $k\Omega$	51 $k\Omega$ + 2 $k\Omega$
C_1	70 pf	68 pf
C_2	70 pf	68 pf

Tabla 8: Componentes seleccionados de la sexta etapa.

3.1. Confección del circuito

Al momento de elaborar el sistema en PCB se tuvieron ciertas consideraciones. Es común que, dado el factor Q del circuito, un filtro del tipo notch introduzca un sobrepico en una zona previa o posterior a la banda rechazada. Es por ello que se decidió introducir presets que permitan el ajuste adecuado del sistema. Se introdujeron dichas resistencias variables en las impedancias R_2 de las etapas 1 y 5 y R_7 de las etapas 5 y 6. R_2 permite modificar la ganancia de banda pasante y el factor Q de los polos, mientras que R_7 el ω_o de los ceros y la ganancia de banda pasante. De esta forma se pudo configurar el sistema para que se presente el menor sobre pico en banda pasante y garantizar la atenuación máxima de 1 dB en dicha etapa.

De esta forma, se confeccionó el siguiente PCB.

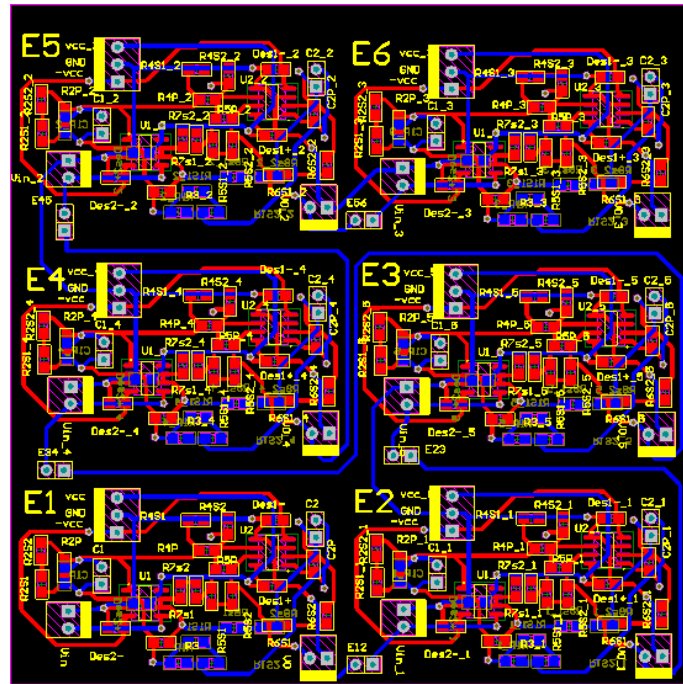


Figura 3: PCB elaborado.

Se decidió además confeccionar un diagrama de polos y ceros del circuito completo. De esta forma, se sabe que si los diagramas de Bode medidos y teóricos se corresponden, entonces los polos y ceros también lo harán.

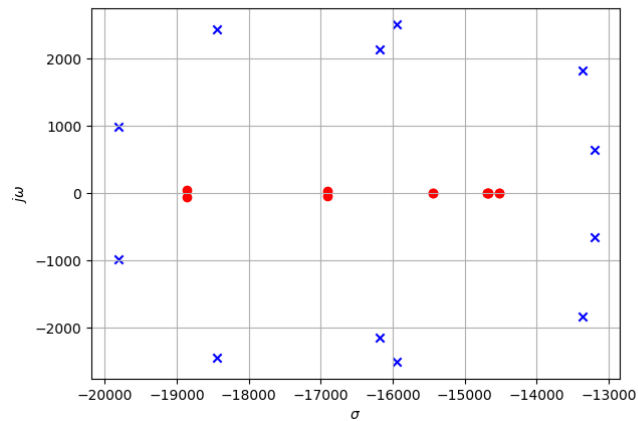
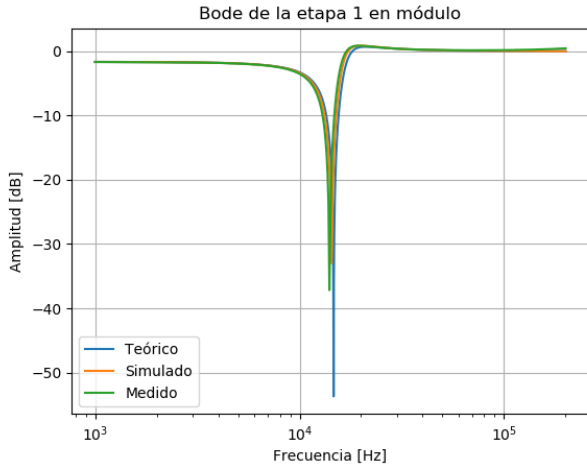


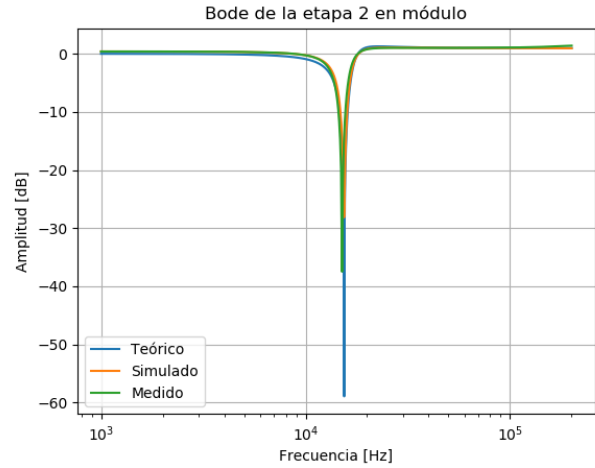
Figura 4: Diagrama de polos y ceros del circuito total.

Se remarca que, recorriendo de derecha a izquierda, los tres primeros ceros son ceros dobles, los cuales se encuentran superpuestos, dificultando su visualización.

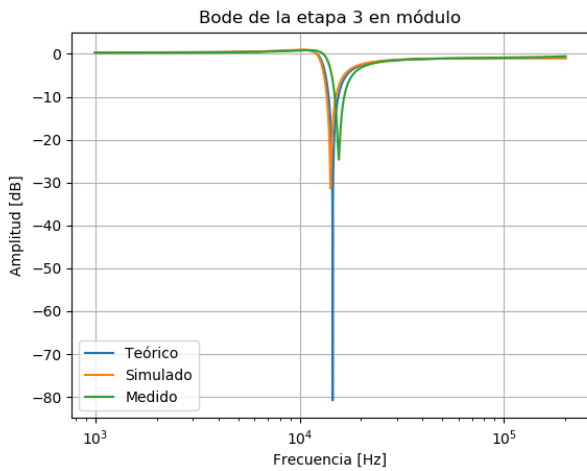
Luego, al momento de confeccionar la placa, se decidió colocar terminales junto con jumpers de forma que sea posible desconectar las etapas entre sí, aislándolas para poder medirlas por separado. De esta forma, se procedió a medir cada etapa y contrastar dicho resultado con las curvas teóricas y simuladas, estas últimas obtenidas mediante el software LTSpice.



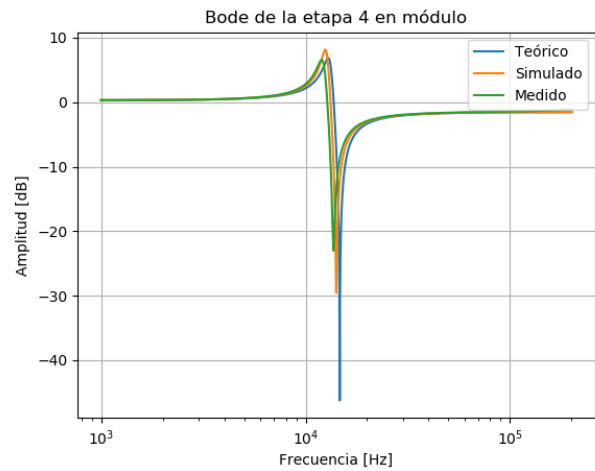
(a) Ganancia de tensión de la primer etapa en módulo.



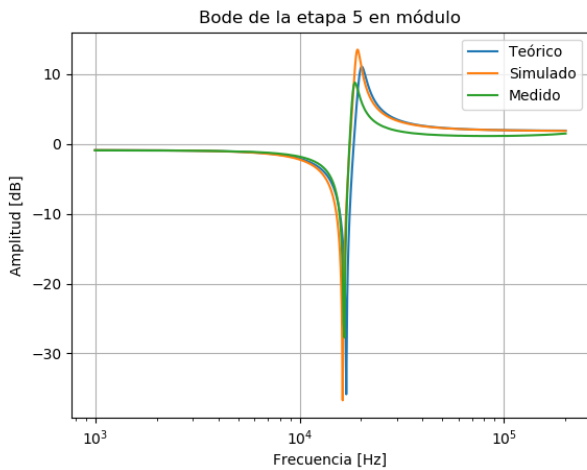
(b) Diagrama de Bode de la segunda etapa en módulo.



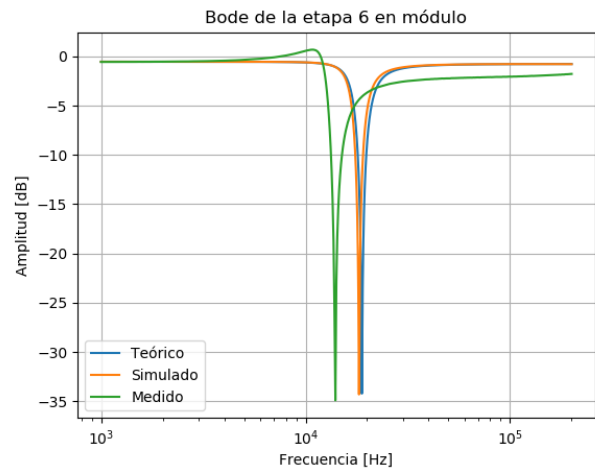
(c) Diagrama de Bode de la tercer etapa en módulo.



(d) Diagrama de Bode de la cuarta etapa en módulo.



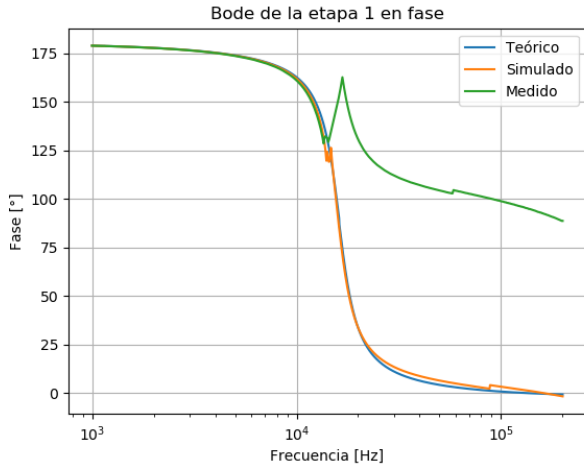
(e) Diagrama de Bode de la quinta etapa en módulo.



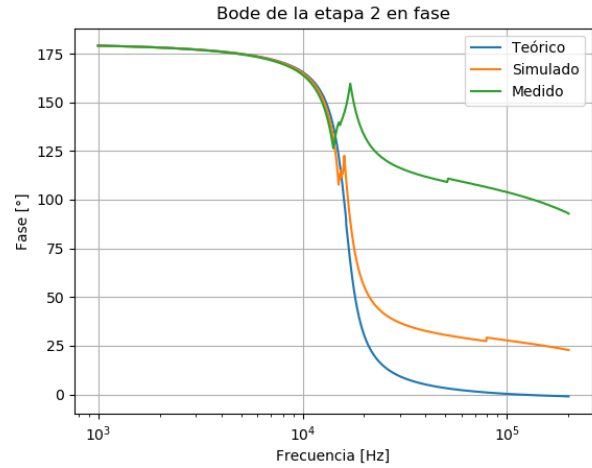
(f) Diagrama de Bode de la sexta etapa en módulo.

Figura 5: Comparación de los Bodes de las etapas en módulo.

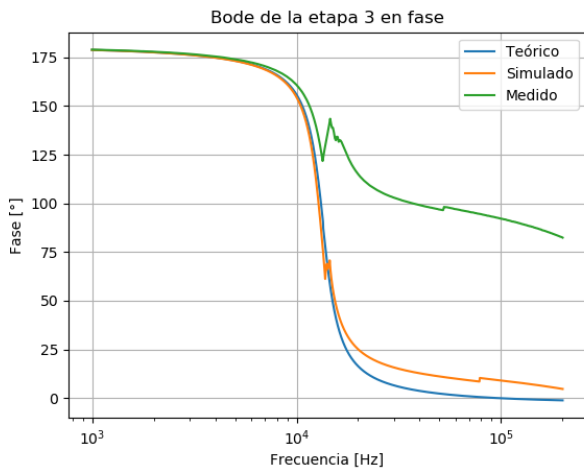
Se atribuyen las pequeñas discrepancias entre las curvas a los presets puestos, ya que no se pudo determinar su valor con exactitud.



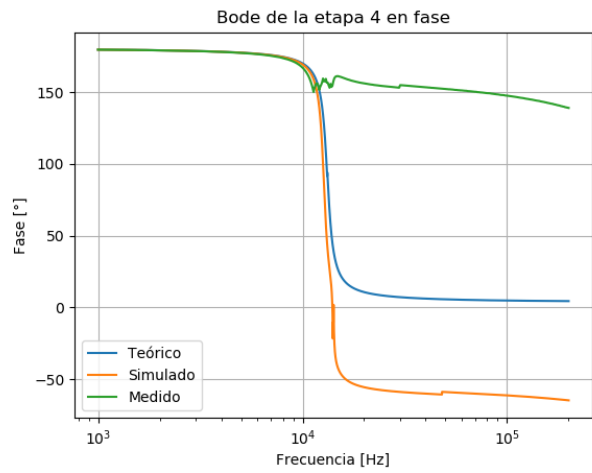
(a) Diagrama de Bode de la primer etapa en fase.



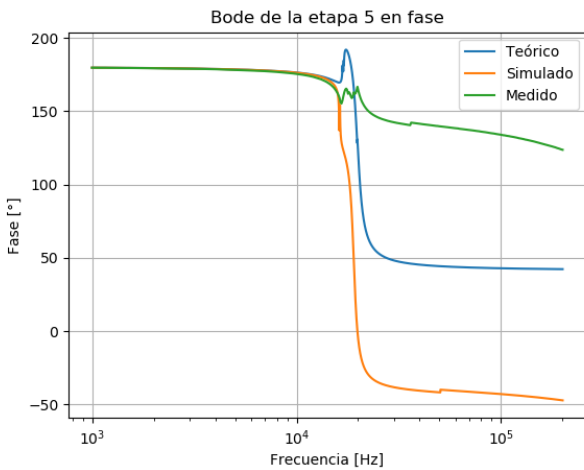
(b) Diagrama de Bode de la segunda etapa en fase.



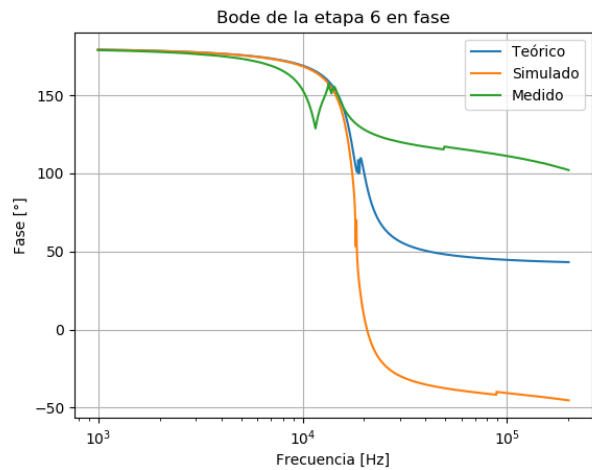
(c) Diagrama de Bode de la tercer etapa en fase.



(d) Diagrama de Bode de la cuarta etapa en fase.



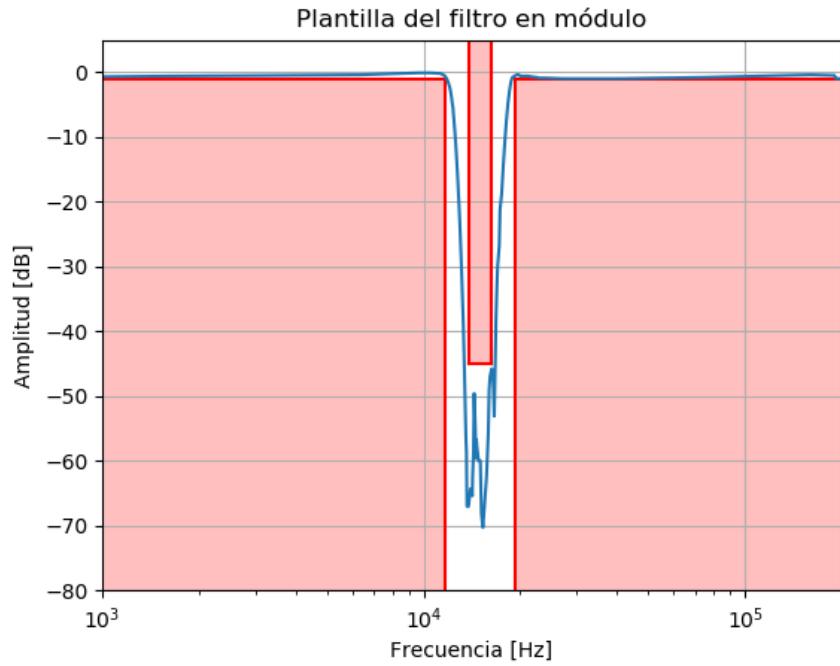
(e) Diagrama de Bode de la quinta etapa en fase.



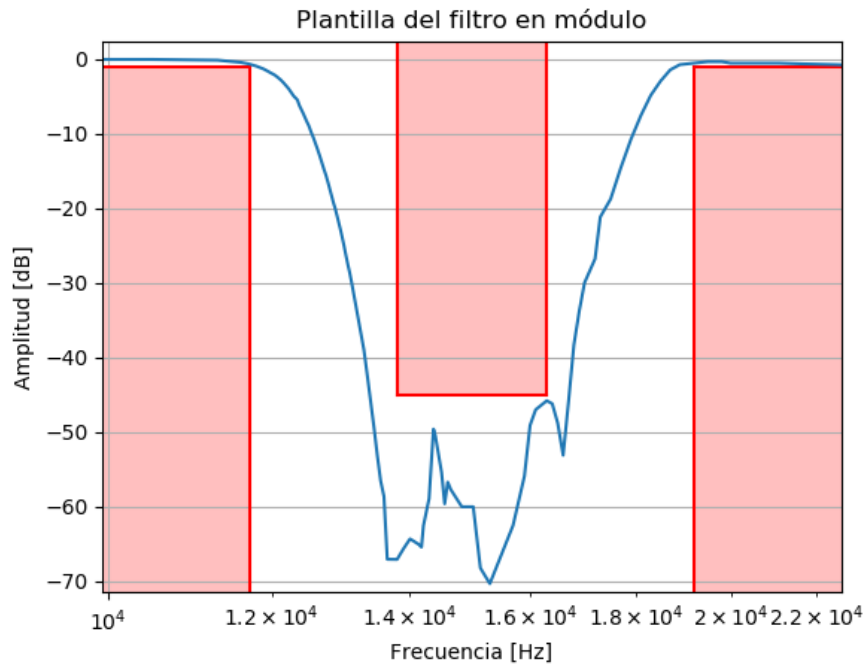
(f) Diagrama de Bode de la sexta etapa en fase.

Figura 6: Comparación de los Bodes de las etapas en fase.

Finalmente, se optó por medir la ganancia de tensión del sistema y contrastarla con la plantilla deseada, de esta forma se puede corroborar con mayor facilidad el logro del objetivo deseado.



(a) Totalidad del filtro medido.



(b) Banda atenuante.

Figura 7: Medición del filtro y su respectiva plantilla.

3.2. Rango dinámico

El rango dinámico se define como la razón entre el máximo y el mínimo valor que puede tomar el observable de interés. Para el caso en cuestión queda definido de la siguiente manera:

$$R_d = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{in_{max}}}{V_{in_{min}}} \right) \quad (17)$$

Para definir $V_{in_{min}}$ se tuvo en cuenta la tensión mínima que se puede distinguir respecto al piso de ruido, la cual es determinada como $V_{in_{min}} \approx 10 \text{ mV}$. Luego, para el caso de $V_{in_{max}}$, se consideró la máxima tensión previa a la

aparición de distorsiones o alinealidades del amplificador operacional, siendo el cross-over, slew-rate y saturación del mismo algunos de estos efectos. Tanto el cross-over como el slew-rate son aspectos de poco interés, dado que, como para este filtro se seleccionó el amplificador [LM833](#), ya que posee un elevado slew-rate y, dada su etapa de salida, el efecto de cross-over no genera problemas. Es así que, dada los sobre picos existentes, se determinó que esta tensión máxima es de 2 V , de esta forma se determina el rango dinámico:

$$R_d = 20 \log \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) = 46.02 \text{ dB} \quad (18)$$

3.3. Máxima carga

Para la estimación de la máxima carga, se tomó la máxima corriente que el operacional puede brindar, siendo esta de 2.8 mA . Considerando la tensión máxima de entrada, y que esta no es amplificada, se estima la carga máxima del sistema como $R_{max} = \frac{V_{in_{max}}}{I_{o_{max}}} = \frac{2\text{ V}}{2.8\text{ mA}} \approx 714.3\ \Omega$.

3.4. Ganancia de lazo

Se simuló la ganancia de lazo del sistema. Ya que para cada etapa, el resultado obtenido es para cada caso el mismo, presentando pequeñas diferencias propias de los componentes seleccionados. Esto se debe a que todas las empleadas son celdas universales del tipo Fleischer-Tow, por lo que es epserable dicho resultado. Es así se optó por presentar la simulación de la primer etapa y generalizar para las demás.

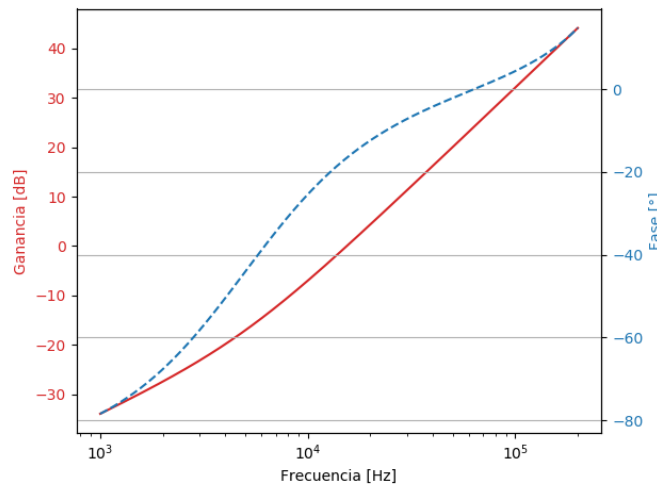


Figura 8: Ganancia de lazo de cada etapa.

Se observa de este que, dado que la frecuencia nunca alcanza los 180° de desfazaje, el sistema cumple con la condición de Barkhausen demostrando estabilidad.