

*spanishcaptions [unicode, charset=utf8, fontenc=EU1 EU2]
 spanishstringprocess BibliografÃaCapÃtuloAppendixApÃndiceList of Fig-
 uresÃndice de figurasList of TablesÃndice de cuadrosIndexÃndice alfabÃcticopÃiginavÃasevÃase
 tambiÃnDemostraciÃ3n*Contentsndice*
 *spanishcaptions
 spanishstringprocess PrefacioReferencesReferenciasAbstractResumenBibliografÃa-
 CapÃtuloAppendixApÃndiceList of FiguresÃndice de figurasList of TablesÃndice
 de cuadrosIndexÃndice alfabÃticoFigureFiguraTableCuadroPartParteAdjuntoCopia
 aApÃginavÃasevÃase tambiÃnDemostraciÃnGlosarioContentsÃndice *spanishdate
 month1nameenero,febrero,marzo,abril,mayo,junio,julio,agosto,septiembre,octubre,noviembre,diciembre
 ucmonth1nameEnero,Febrero,Marzo,Abril,Mayo,Junio,Julio,Agosto,Septiembre,Octubre,Noviembre,Diciembre
 December 1, 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

TEORÍA DE LOS CIRCUITOS 2017

TRABAJO PRÁCTICO DE LABORATORIO FINAL

Filtro Final

Integrantes:

Gonzalo REINA KIPERMAN	56102
Ignacio DOMINGUEZ	56442
Facundo MATEOS	56452
Ramiro MERELLO	56622

30/11/2017

Contents

1. Introducción	2
2. Diseño Teórico Rechaza Banda	2
2.1. Polos y Ceros De La Función Transferencia	3
2.2. Elección Celdas a Emplear	4
2.3. Análisis Flescher Tow	5
2.3.1. Análisis Ideal del circuito	5
2.4. Análisis de sensibilidades	6
3. Orden De Las Etapas	6
4. Gráficos de Curvas Teóricas	7
4.1. Etapa I	7
4.2. Etapa II	7
4.3. Etapa III	8
4.4. Etapa IV	8
4.5. Etapa V	9
5. Simulaciones y análisis de montecarlo	9
5.1. Etapa 1	9
5.2. Etapa 2	10
5.3. Etapa 3	10
5.4. Etapa 4	11
5.5. Etapa 5	11
5.6. Análisis de montecarlo circuito completo	11
6. Consideraciones Prácticas del Diseño del Circuito Impreso(PCB)	12
7. Mediciones y resultados	13
7.1. Respuesta en frecuencia	13
7.2. Respuesta al escalón	15
8. Análisis de Costos de Componentes	16
9. Conclusión	16

1. Introducción

Este trabajo aborda el diseño de un filtro de tipo rechaza banda, incluye el diseño teórico para la obtención de las diferentes etapas, el posterior ordenamiento de las etapas, los gráficos de curvas teóricas y acumulativos para cada etapa, consideración de realización de PCB y por último un análisis de costos de componentes.

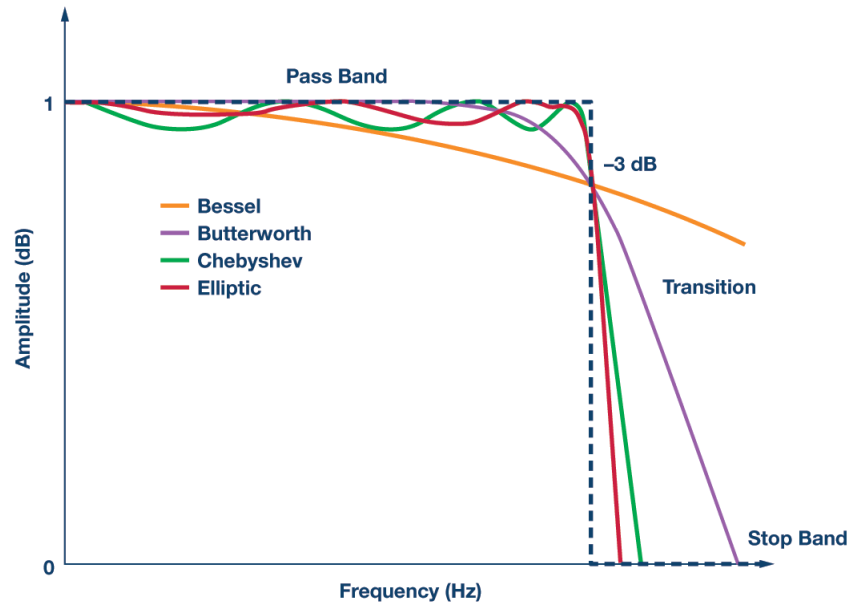


Figure 1: Ejemplo de Distintas Aproximaciones para Filtros

2. Diseño Teórico Rechaza Banda

La plantilla de diseño es de una selectividad considerable, resulta de esta forma necesario emplear la aproximación de Cauer para minimizar el orden. Para lograr minimizar el orden la aproximación agrega ripple tanto en banda pasante como en banda atenuante.

Aproximación	Cauer	Aproximación	Cauer
A_p	2 dB	A_p	0.4 dB
A_a	45 dB	A_a	52.9 dB
f_p^-	600 Hz	f_p^-	600 Hz
f_a^-	800 Hz	f_a^-	800 Hz
f_a^+	2300 Hz	f_a^+	2300 Hz
f_p^+	3000 Hz	f_p^+	3000 Hz
Notch depth	55 dB	Gain	-0.2 dB
Orden	8	Notch depth	55 dB
		Orden	10

Table 1: Requisito de Diseño Teórico y Prácticos Respectivamente

Si se observa el cuadro 1 se puede notar una diferencia en orden entre la plantilla teórica y práctica esto se debe a la necesidad de dejar margen en diseño debido a la tolerancia de los componentes.

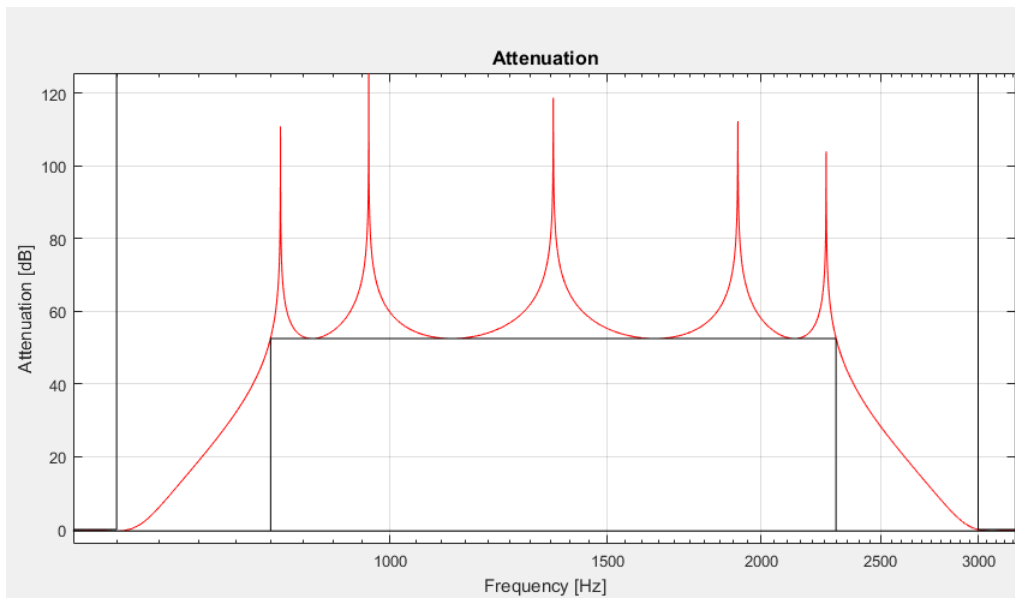


Figure 2: Gráfico Teórico de Atenuación del Filtro a Realizar

2.1. Polos y Ceros De La Función Transferencia

Empleando el trabajo práctico cuatro de la materia, se calculó la transferencias del filtro resultante obteniendo de esta forma los polos y ceros de los cuadros 2 y 3

Frecuencia de Corte Polo	Factor de Calidad Q	Grado
623,51 Hz	8,64	2
520,98 Hz	1.62	2
2951,03 Hz	8,64	2
368,32 Hz	0,50	1
4995,60 Hz	0,50	1

Table 2: Frecuencia de Polos Resultantes

Frecuencia de Cero Transmisión
814,54 Hz
960,67 Hz
1356,47 Hz
1915,33 Hz
2258,94 Hz

Table 3: Frecuencia de Ceros de Transmisión Resultantes

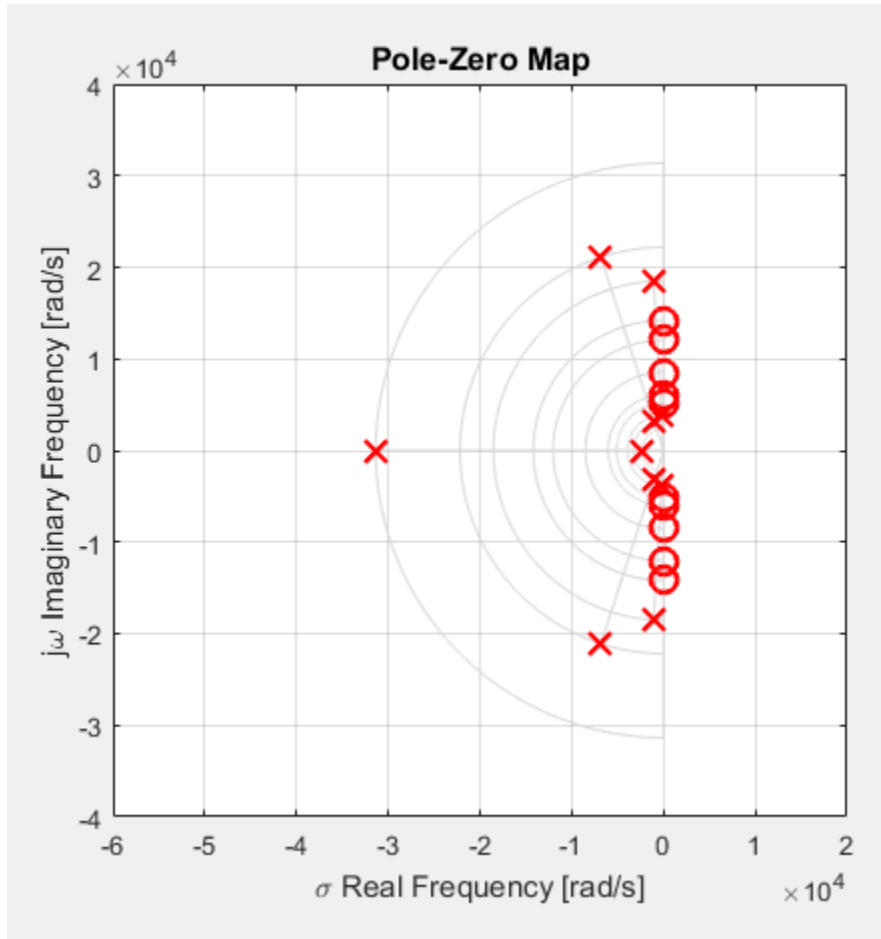


Figure 3: Diagrama de Polos y Ceros de Filtro

Si observamos la figura 3 veremos la presencia de ceros de transmisión, estos se deben a la aproximación Cauer, que fue empleada para hacer que el filtro cumpla la plantilla, esta aproximación agrega el ripple en las bandas pasante y atenuante mediante los ceros de transmisión. Esto será un factor central en la decisión de que celdas emplear para la realización en la siguiente subsección

2.2. Elección Celdas a Emplear

La aproximación de filtro empleada para el diseño requiere que cada celda cuente con un par de ceros de transmisión y un par de polos conjugados o reales. Esto reduce significativamente las posibles celdas a utilizar, dejando como posibles celdas a emplear:

- Celda Rauch
- Celda Sedra
- Celda Akerberg-Mossberg
- Celda Flescher-Tow

De las posibles celdas a emplear se optó por la celda Flescher Tow, que consiste en una celda universal con baja sensibilidad y la característica de poder realizar ajuste que dependan de menos componentes que otros celdas, a diferencia de por ejemplo la Sedra, esto permitió fijar los valores de capacitores y agrupar solamente las resistencias simplificando considerablemente la materialización del PCB.

2.3. Análisis Fleisher Tow

La celda Fleisher Tow es una modificación de la celda Tow Thomas, que permite obtener cualquier transferencia de segundo orden sin necesidad de agregar OpAmps. Para lograr esto, se agregan dos caminos de 'feed-forward', que terminan agregando ceros al sistema.

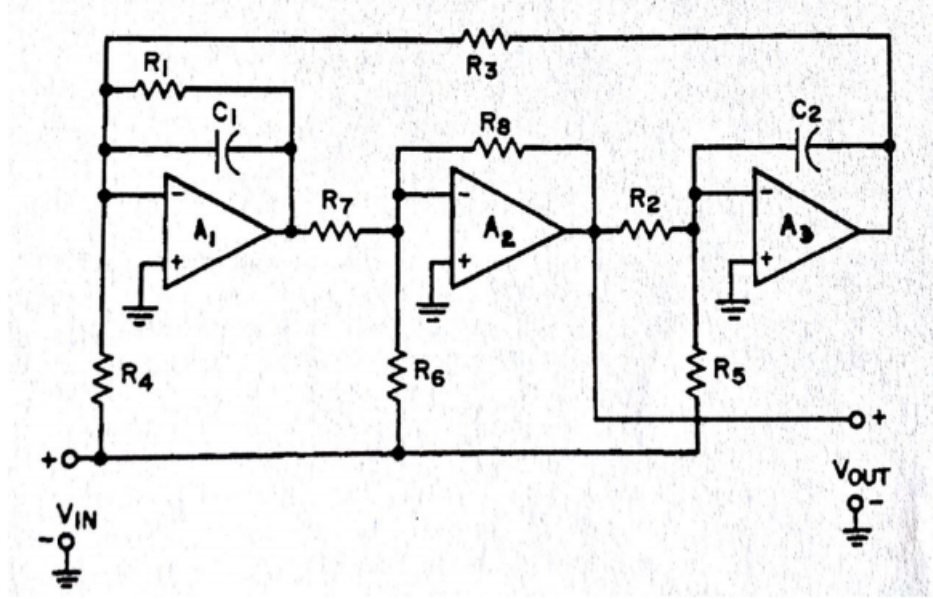


Figure 4: Celda Fleisher Tow

2.3.1. Análisis Ideal del circuito

De acuerdo a la figura 4, considerando que los OpAmps utilizados son ideales, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} V_1 = V_3 = V_5 = 0 & \text{Tierra Virtual} \\ V_2 = -V_{in} \cdot (R_1 \parallel Z_{C1}) \cdot \left(\frac{V_{In}}{R_4} + \frac{V_6}{R_3} \right) & \text{Ecuación sumador inversor} \\ V_4 = -R_B \cdot \left(\frac{V_2}{R_A} + \frac{V_{In}}{R_5} \right) & \text{Ecuación sumador inversor} \\ V_6 = -Z_{C2} \cdot \left(\frac{V_4}{R_2} + \frac{V_{In}}{R_6} \right) & \text{Ecuación sumador inversor} \end{cases}$$

Resolviendo este sistema, se tiene que

$$\begin{cases} V_2 = -\frac{R_1 \cdot R_A \cdot (R_B \cdot R_4 \cdot R_6 - R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 + C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot s)}{R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A \cdot s^2 + C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A \cdot s + R_1 \cdot R_B)} \\ V_4 = -\frac{R_2 \cdot R_B \cdot (R_1 \cdot R_4 \cdot R_5 + C_2 \cdot R_A \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6 \cdot s - C_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot s + C_1 \cdot C_2 \cdot R_A \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6 \cdot s^2)}{R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A \cdot s^2 + C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A \cdot s + R_1 \cdot R_B)} \\ V_6 = -\frac{R_3 \cdot (R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_A - R_A \cdot R_B \cdot R_4 \cdot R_6 + R_1 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot R_B - C_1 \cdot R_A \cdot R_B \cdot R_1 \cdot R_4 \cdot R_6 \cdot s + C_1 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_A \cdot s)}{R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A \cdot s^2 + C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A \cdot s + R_1 \cdot R_B)} \end{cases}$$

Acomodando un poco

$$\begin{cases} V_2 = -\frac{R_B \cdot R_6 \cdot R_A - R_2 \cdot R_5 \cdot R_A}{R_5 \cdot R_6 \cdot R_B} \cdot \frac{1 + \frac{C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_5 \cdot R_6}{R_B \cdot R_4 \cdot R_6 - R_2 \cdot R_4 \cdot R_5} \cdot s}{\frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_B} \cdot s^2 + \frac{C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_1 \cdot R_B} \cdot s + 1} \\ V_4 = -\frac{R_2}{R_6} \cdot \frac{(1 + \frac{C_2 \cdot R_A \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6 - C_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_5 \cdot R_6}{R_1 \cdot R_4 \cdot R_5} \cdot s + \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_A \cdot R_3 \cdot R_6}{R_5} \cdot s^2)}{\frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_B} \cdot s^2 + \frac{C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_1 \cdot R_B} \cdot s + 1} \\ V_6 = -\frac{R_3 \cdot (R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_A - R_A \cdot R_B \cdot R_4 \cdot R_6 + R_1 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot R_B)}{R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot R_1 \cdot R_B} \cdot \frac{(1 + \frac{C_1 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_A - C_1 \cdot R_A \cdot R_B \cdot R_1 \cdot R_4 \cdot R_6}{R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_A - R_A \cdot R_B \cdot R_4 \cdot R_6 + R_1 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot R_B} \cdot s)}{\frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_B} \cdot s^2 + \frac{C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_1 \cdot R_B} \cdot s + 1} \end{cases}$$

Tomando $R_4 = \frac{R_5 \cdot R_1}{R_A}$

$$V_4 = -\frac{R_2}{R_6} \cdot \frac{1 + \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_A \cdot R_3 \cdot R_6}{R_5} \cdot s^2}{\frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_B} \cdot s^2 + \frac{C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}{R_1 \cdot R_B} \cdot s + 1} = -K \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_1^2} + 1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{1}{Q \cdot \omega_0} \cdot s + 1}$$

Donde

$$\omega_0^2 = \frac{R_B}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_A}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \cdot \sqrt{\frac{R_B}{R_A}} \cdot \frac{R_1}{\sqrt{R_2 \cdot R_3}}$$

$$\omega_1^2 = \frac{R_5}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_A \cdot R_3 \cdot R_6}$$

$$K = \frac{R_2}{R_6}$$

2.4. Análisis de sensibilidades

Se procedió a realizar un análisis de sensibilidades para los componentes de la celda Flescher Tow.

	$S_x^{w_p}$	$S_x^{Q_p}$	$S_x^{w_z}$	$S_x^{Q_z}$	G_0	G_∞
R_1	0	1	0	$-\frac{R_4 R_7}{R_1 R_6 - R_4 R_7}$	0	0
R_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	1	0
R_3	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0
R_4	0	0	0	$-\frac{R_1 R_6}{R_1 R_6 - R_4 R_7}$	0	0
R_5	0	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-1	0
R_6	0	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	-1
R_7	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
R_8	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	1
C_1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
C_2	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0

Table 4: Sensibilidades relativa de los valores del filtro en función de los parámetros del mismo

Se puede observar que la celda que se utilizó en general posee baja sensibilidad de sus parámetros.

3. Orden De Las Etapas

Se ordenaron las etapas para maximizar el rango dinámico del filtro, debido a que se trataba de un filtro con gran nivel de atenuación y cuatro notches se considero para alta señal. Por este motivo se ordenaron las etapas de polos de mayor factor de calidad (Q) a menor, buscando evitar que la señal caiga por debajo del piso del ruido.

Etapas	Cero de Transmisión	Polo	Q del Polo
#1	814,79 Hz	623,77 Hz	8,65
#2	2258,26 Hz	2949,80 Hz	8,65
#3	960,87 Hz	521,24 Hz	1,62
#4	1914,92 Hz	3530,05 Hz	1,62
#5	1356,47 Hz	4991,88 Hz y 368,60 Hz	0,50

Table 5: Orden de las Etapas Para Maximizar Orden

4. Gráficos de Curvas Teóricas

A continuación se mostrarán las curvas analíticas para las cinco etapas del filtro, además se incluirá el gráfico acumulativa para cada una de las etapas luego de la primera.

4.1. Etapa I

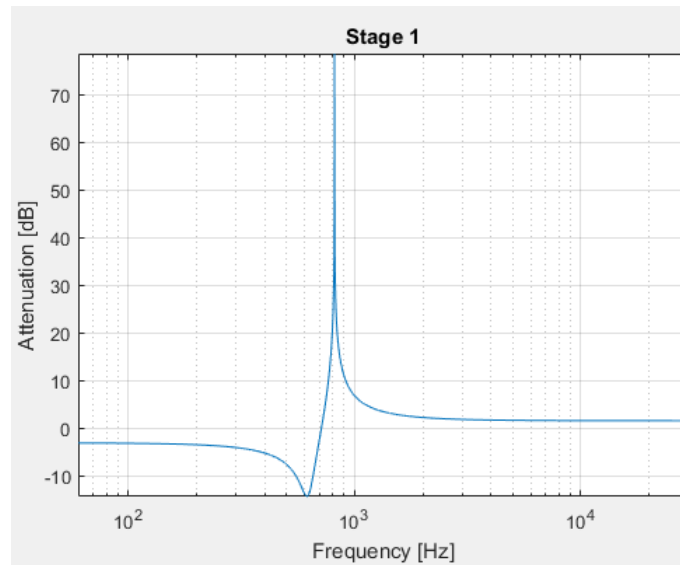


Figure 5: Gráfico Atenuación Teórico Etapa I

4.2. Etapa II

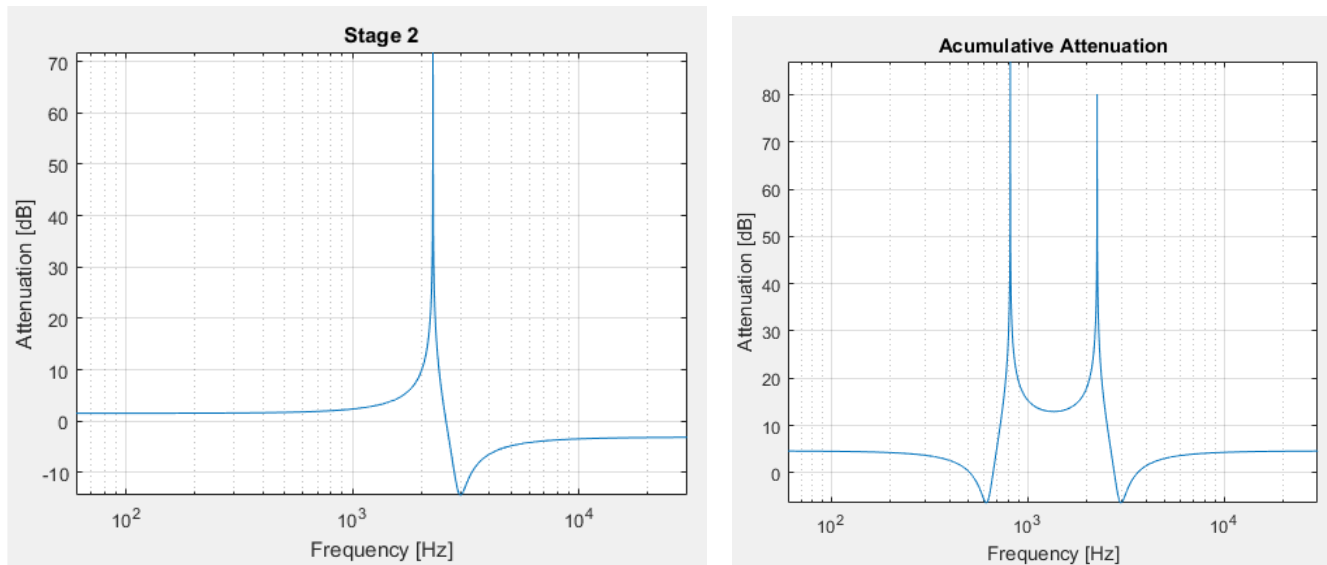


Figure 6: Gráfico Atenuación Teórico Etapa II

4.3. Etapa III

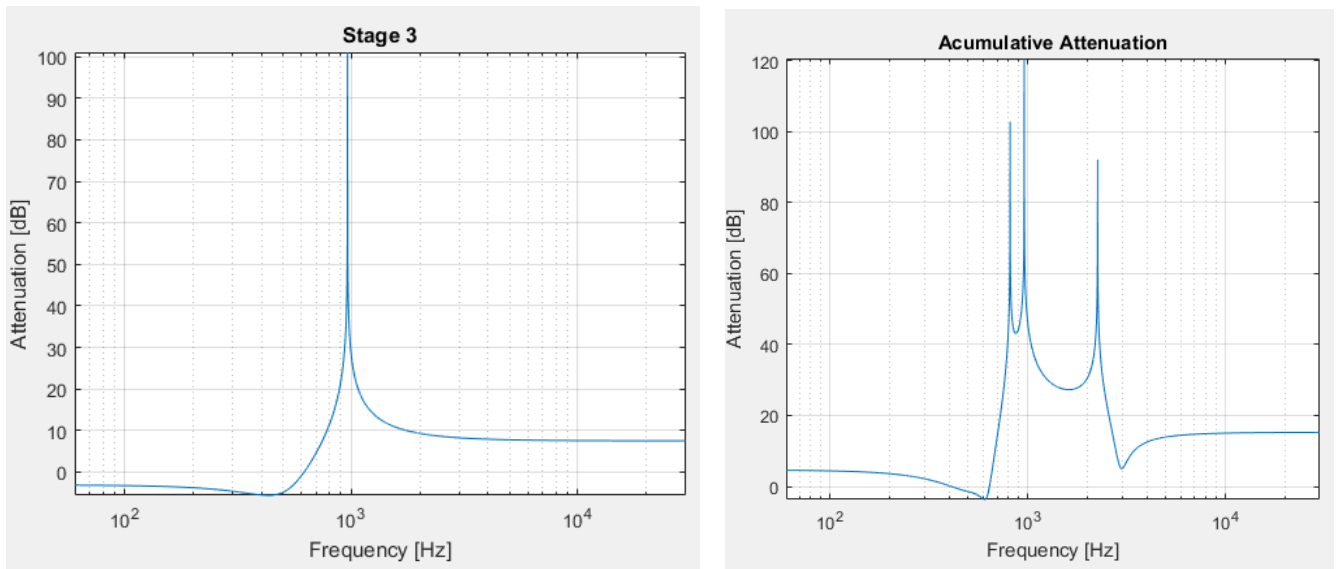


Figure 7: Gráfico Atenuación Teórico Etapa III

4.4. Etapa IV

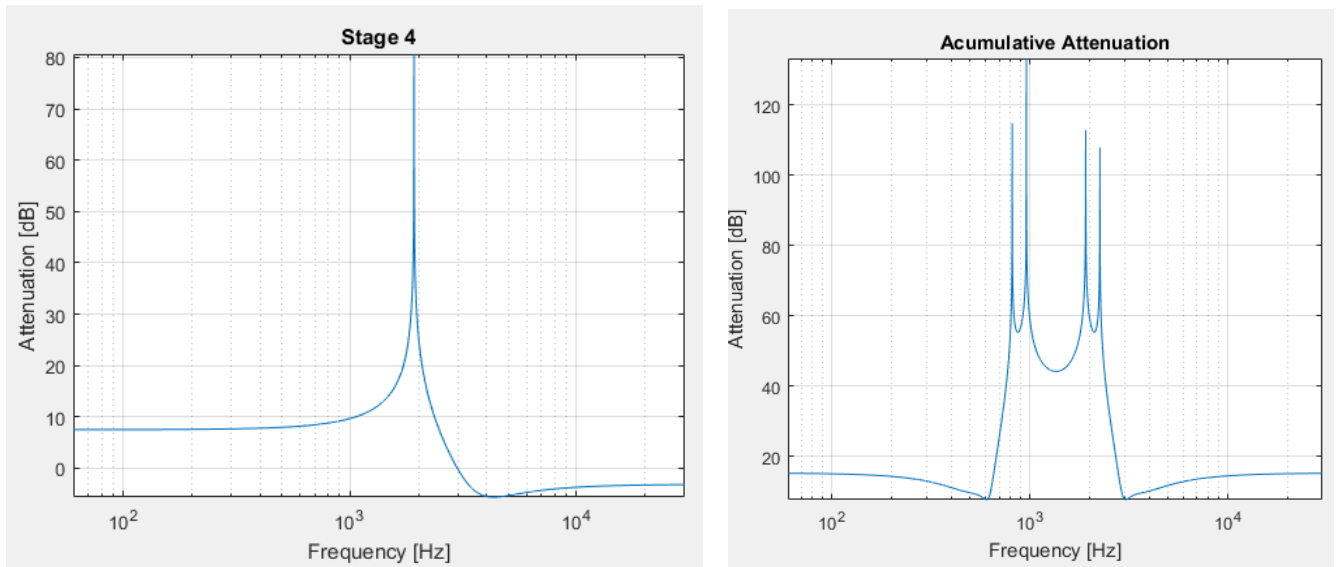


Figure 8: Gráfico Atenuación Teórico Etapa IV

4.5. Etapa V

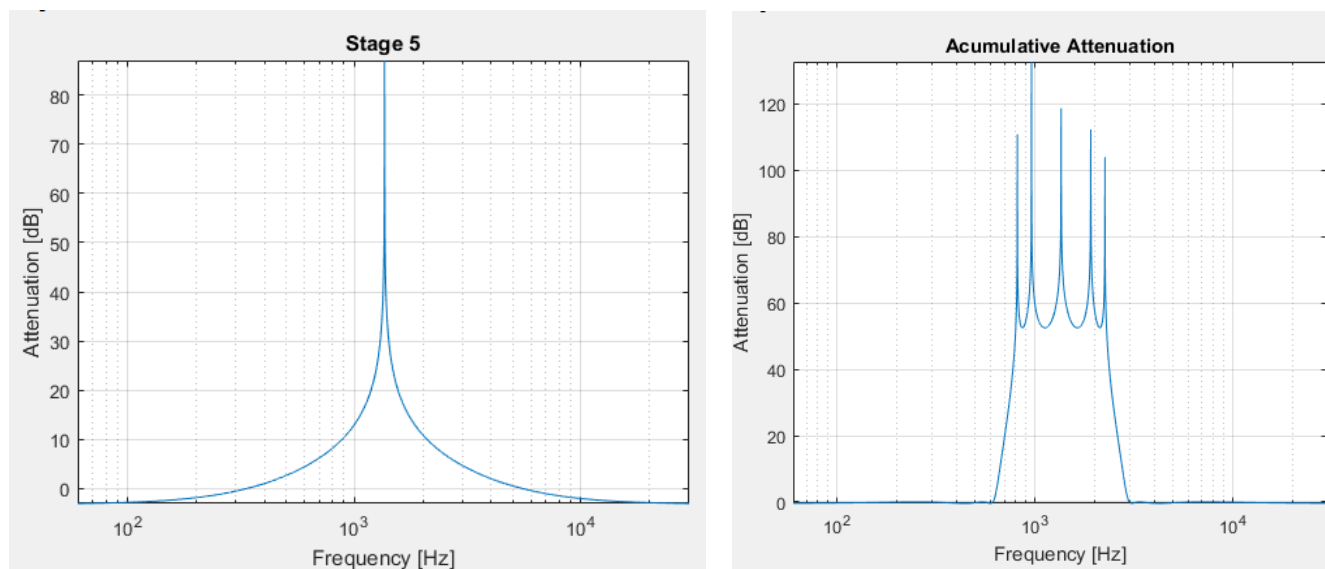


Figure 9: Gráfico Atenuación Teórico Etapa V

5. Simulaciones y análisis de montecarlo

Se realizaron las simulaciones en LTSpice correspondientes a cada etapa (1-5) del circuito por separado, y luego con todo el circuito completo, el análisis de montecarlo, para verificar que en todos, o mayor parte, de los casos se cumpla con la plantilla requerida.

5.1. Etapa 1

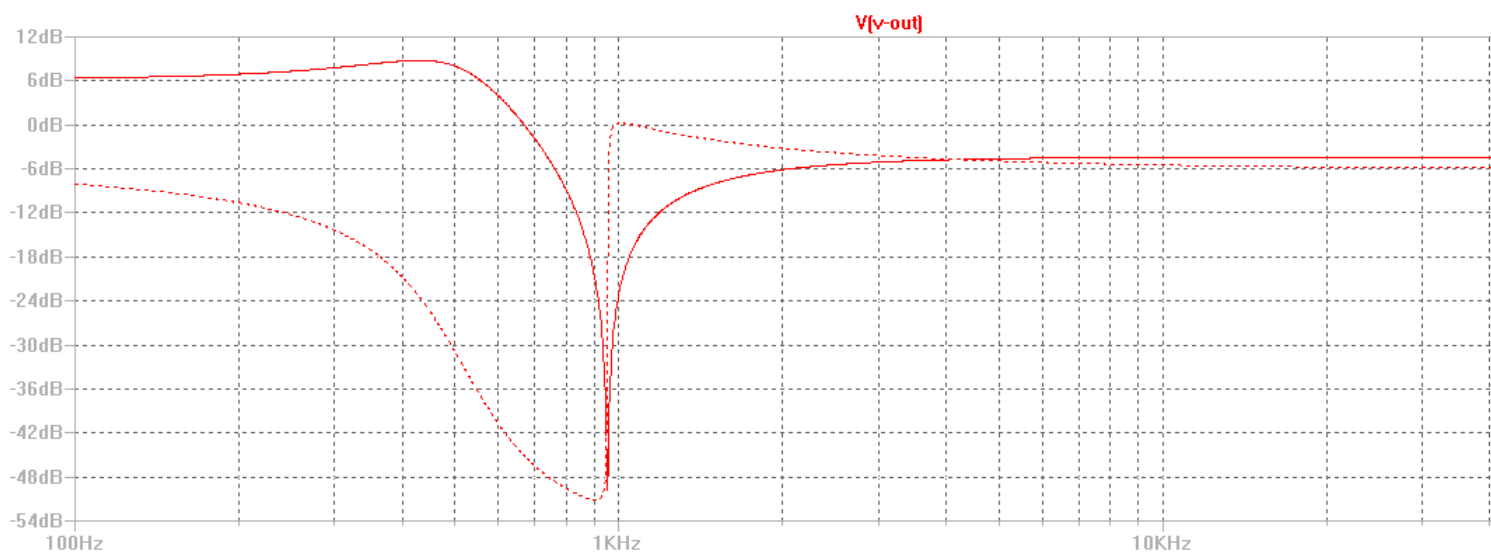


Figure 10: Simulación primera etapa

5.2. Etapa 2

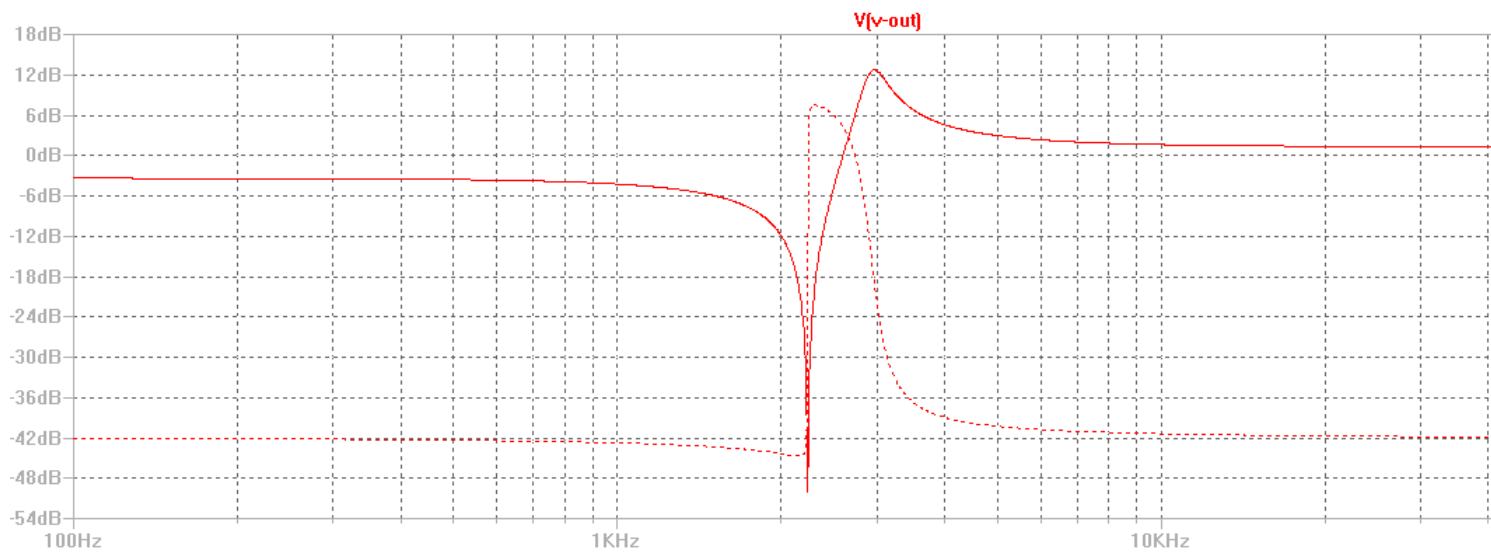


Figure 11: Simulación segunda etapa

5.3. Etapa 3

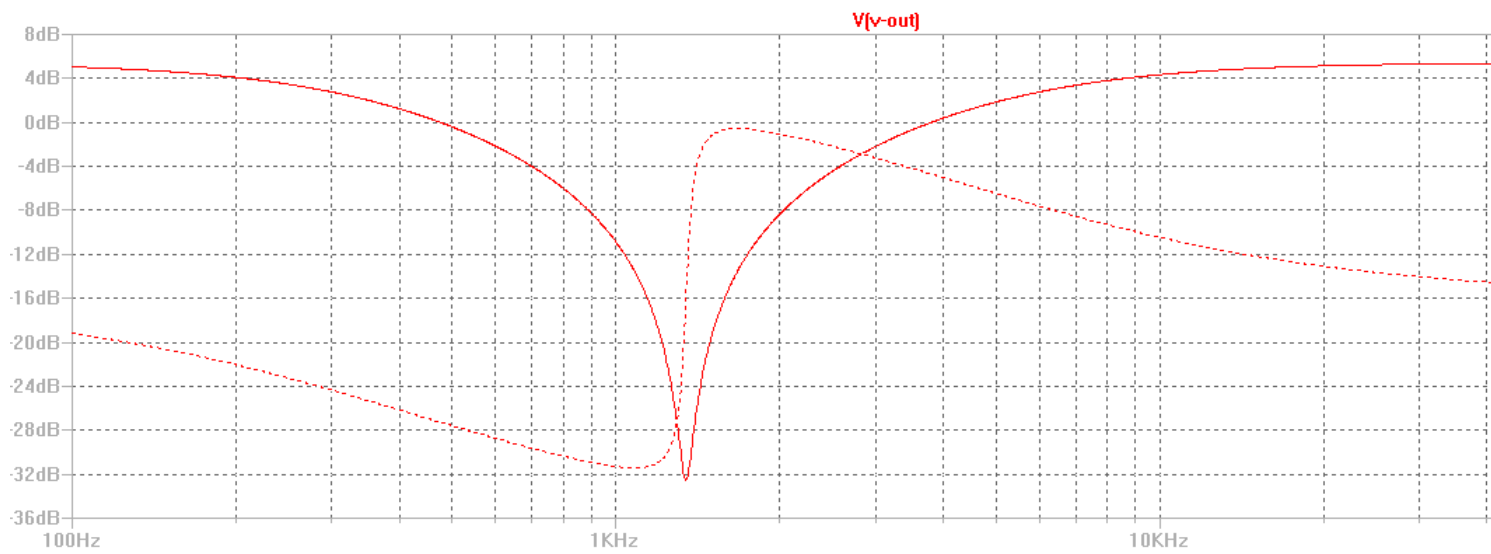


Figure 12: Simulación tercera etapa

5.4. Etapa 4

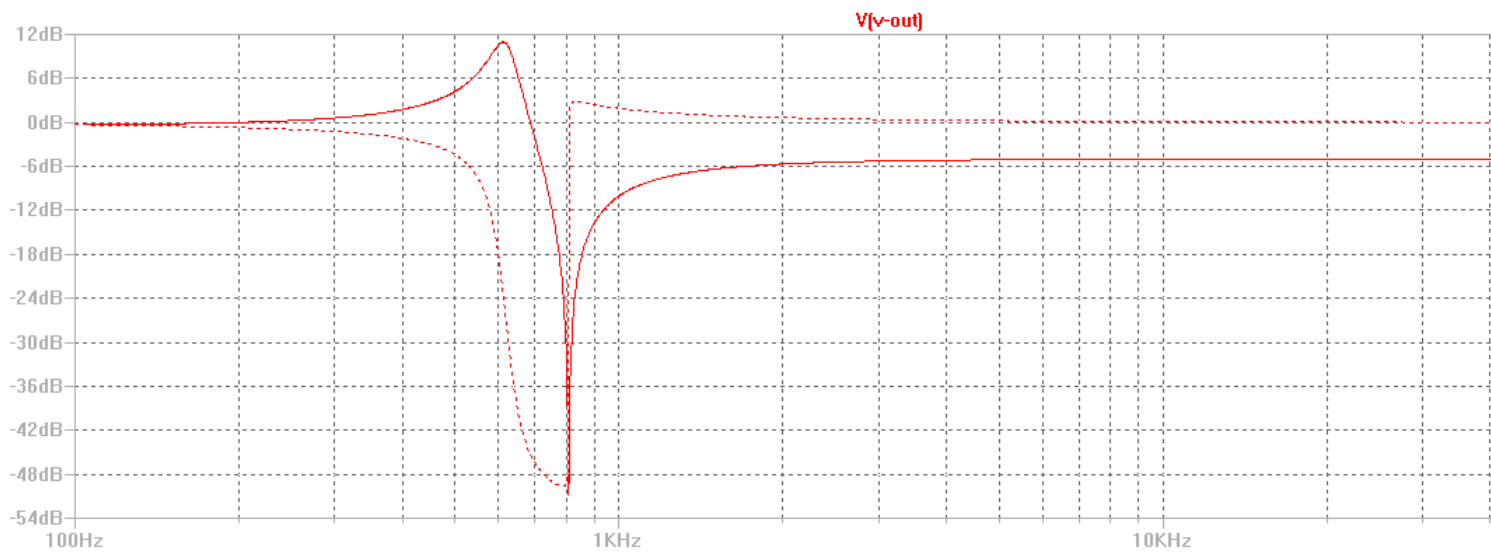


Figure 13: Simulación cuarta etapa

5.5. Etapa 5

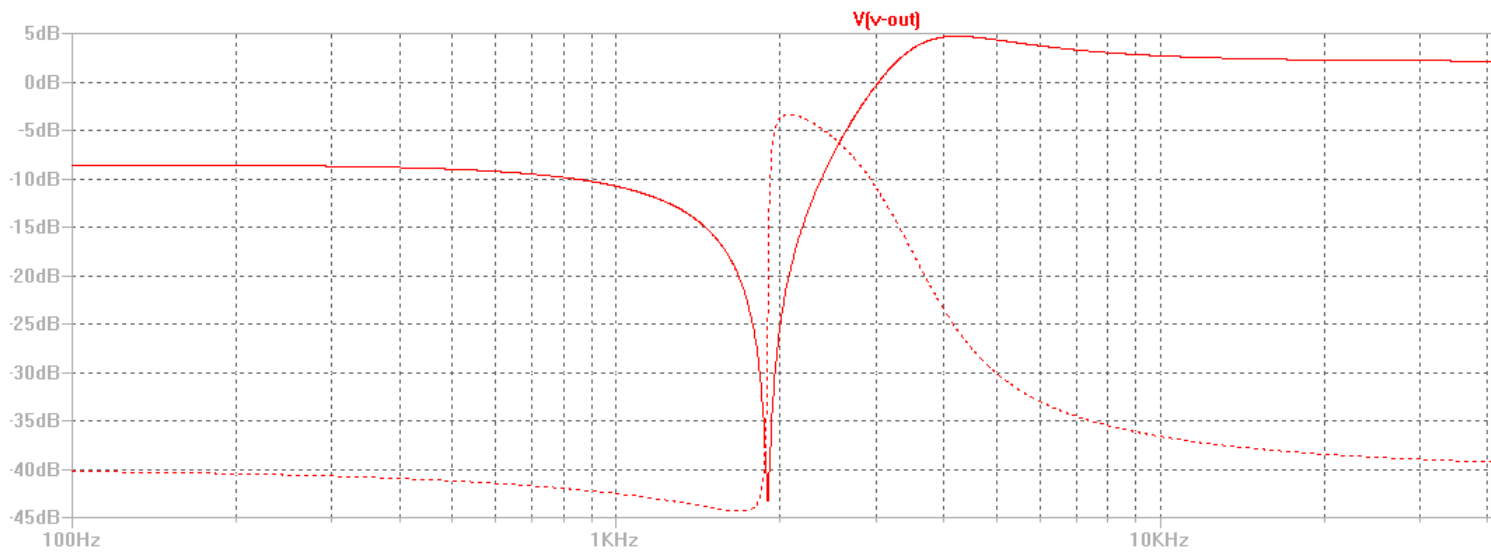


Figure 14: Simulación quinta etapa

5.6. Análisis de montecarlo circuito completo

Se realizó un análisis de montecarlo del circuito completo con las resistencias al 1% y capacitores al 5%.

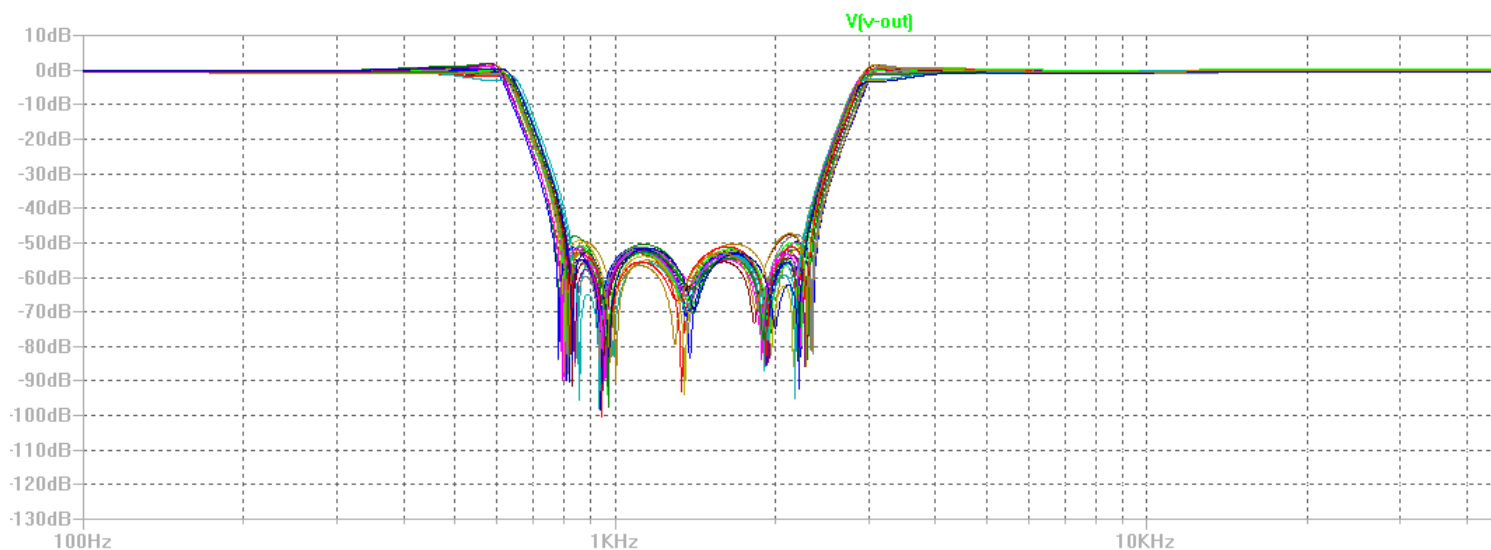


Figure 15: Simulación con análisis de montecarlo

6. Consideraciones Prácticas del Diseño del Circuito Impreso(PCB)

Para la realización del circuito impreso se divido en subetapas separadas por jumpers permitiendo agilizar la realización del esquemático, el rooteo de la placa, la medición de etapas y permitiendo una mayor flexibilidad al diseño. El esquemático de la placa se puede ver en la figura 16.

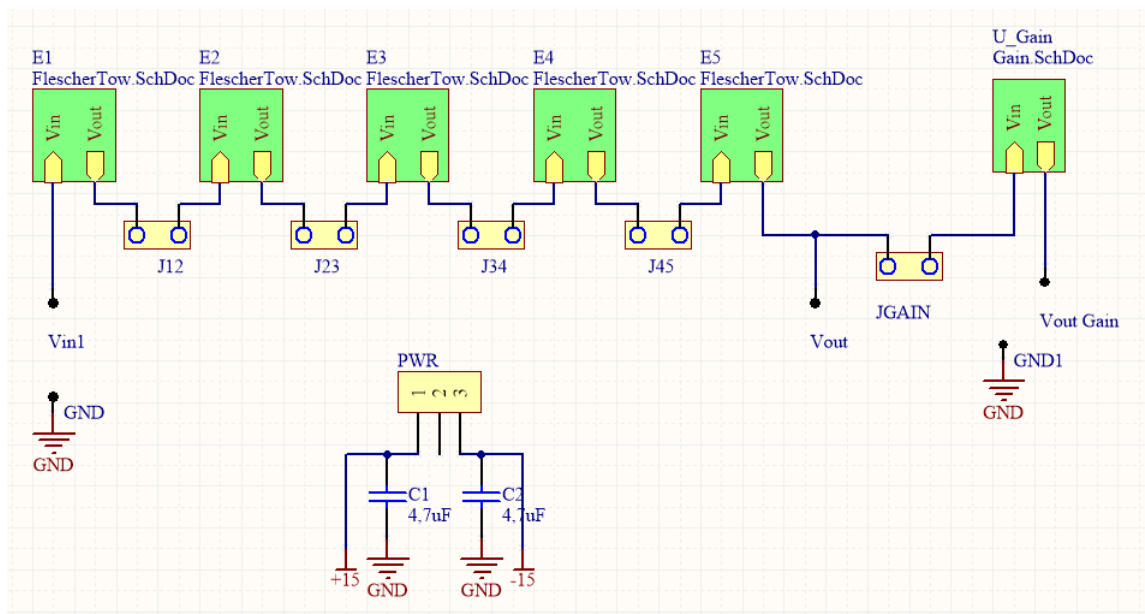


Figure 16: Esquemático Total Empleado Para PCB

La porción correspondiente a la celda Flescher-Tow se puede observar en la figura 17. Para esta etapa se trabajo con resistencias genéricas mediante un footprint propio que permita colocar una combinacion de resistencia serie y/o paralelo(Serie o paralelo) a gusto.

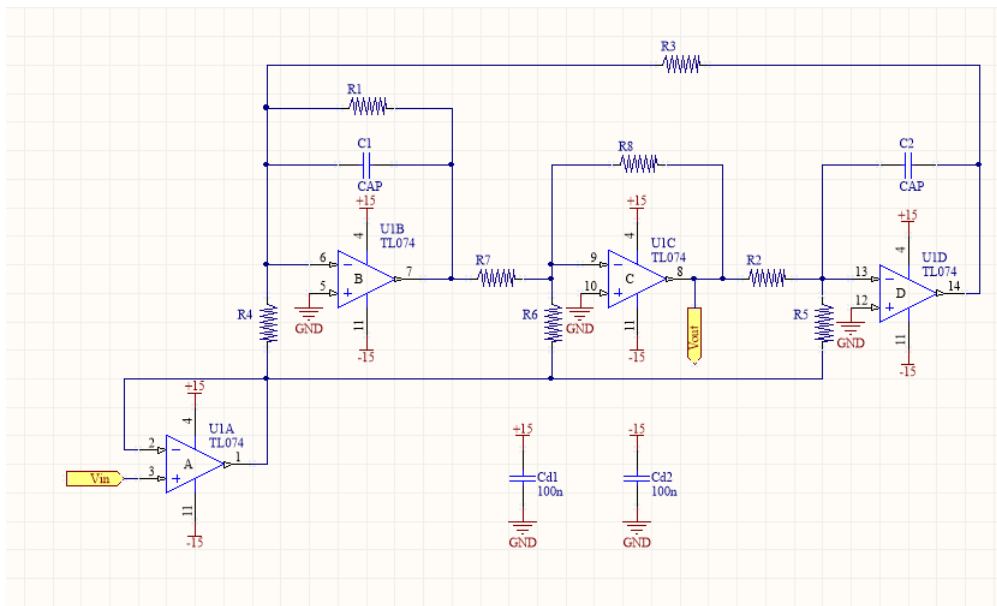


Figure 17: Esquemático Porción Flescher Tow

La agrupación mediante subetapas permitió realizar un rooteo mucho más sencillo ya que solamente fue necesario realizarlo para una etapa y luego copiar para el resto de las etapas mediante herramientas de altium. Se puede ver en el diseño final del PCB en la figura 18 las cinco celdas cada una con un integrado propio y una zona de alta densidad de resistencias en su periferia.

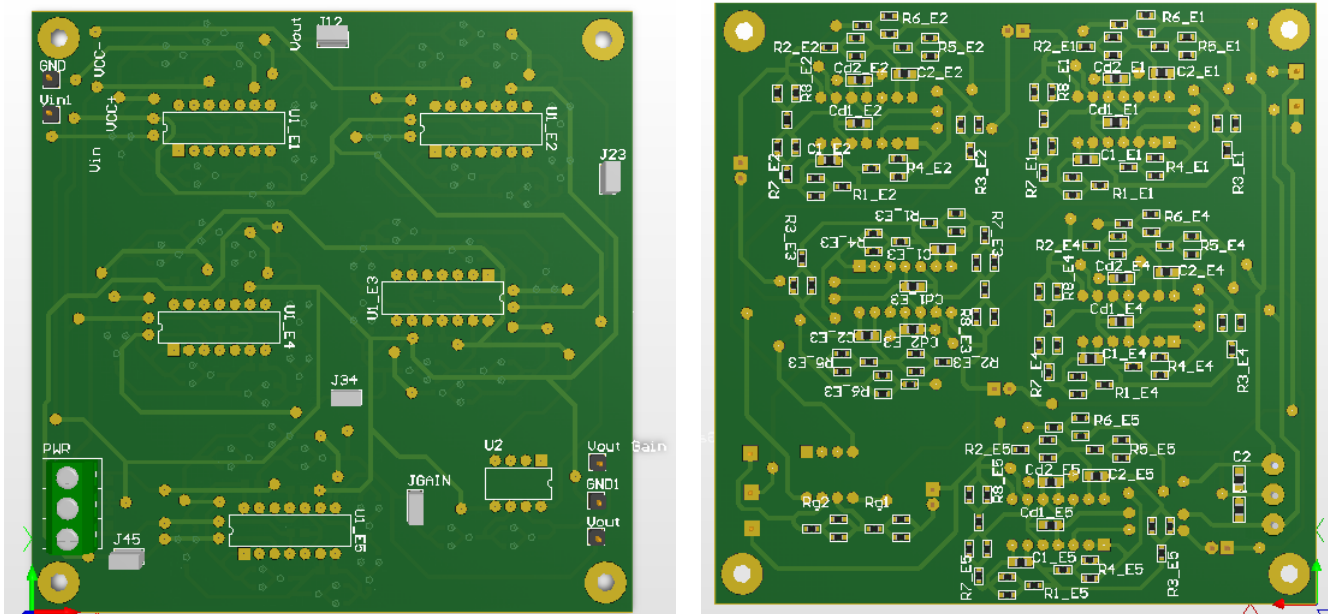


Figure 18: Diseño PCB Final

7. Mediciones y resultados

7.1. Respuesta en frecuencia

Se midió la respuesta en frecuencia del filtro y luego con ayuda de MATLAB se graficó para verificar el cumplimiento de plantilla. Los resultados fueron los siguientes:

Magnitud

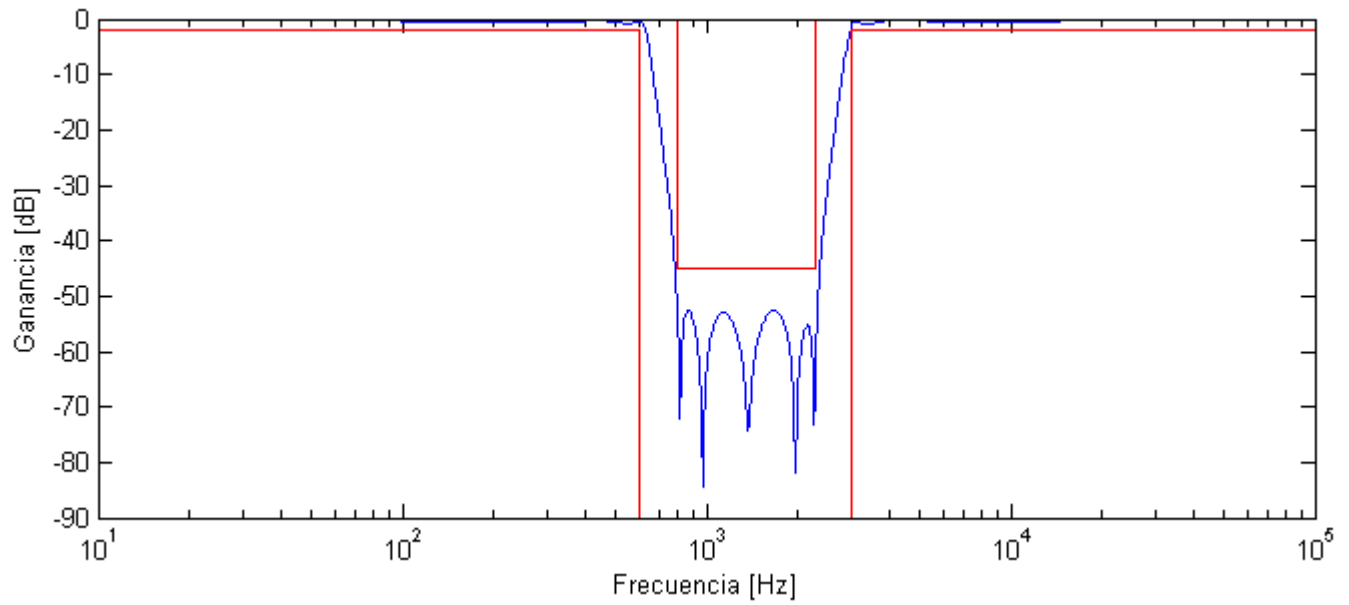


Figure 19: Respuesta en frecuencia del filtro

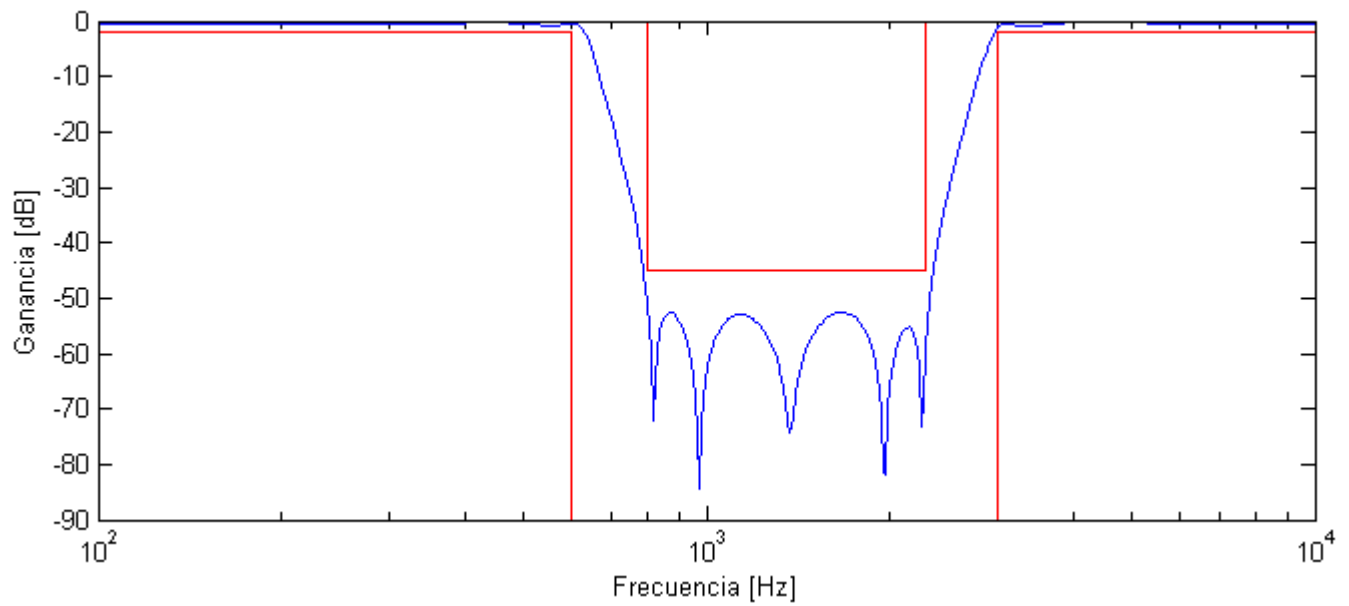


Figure 20: Respuesta en frecuencia del filtro

Se puede observar que el filtro cumple la plantilla requerida. Es más, en la banda de paso la magnitud está entre 0 y -0.3dB, y en la banda atenuante se ubica por debajo de los 50 dB.

Fase

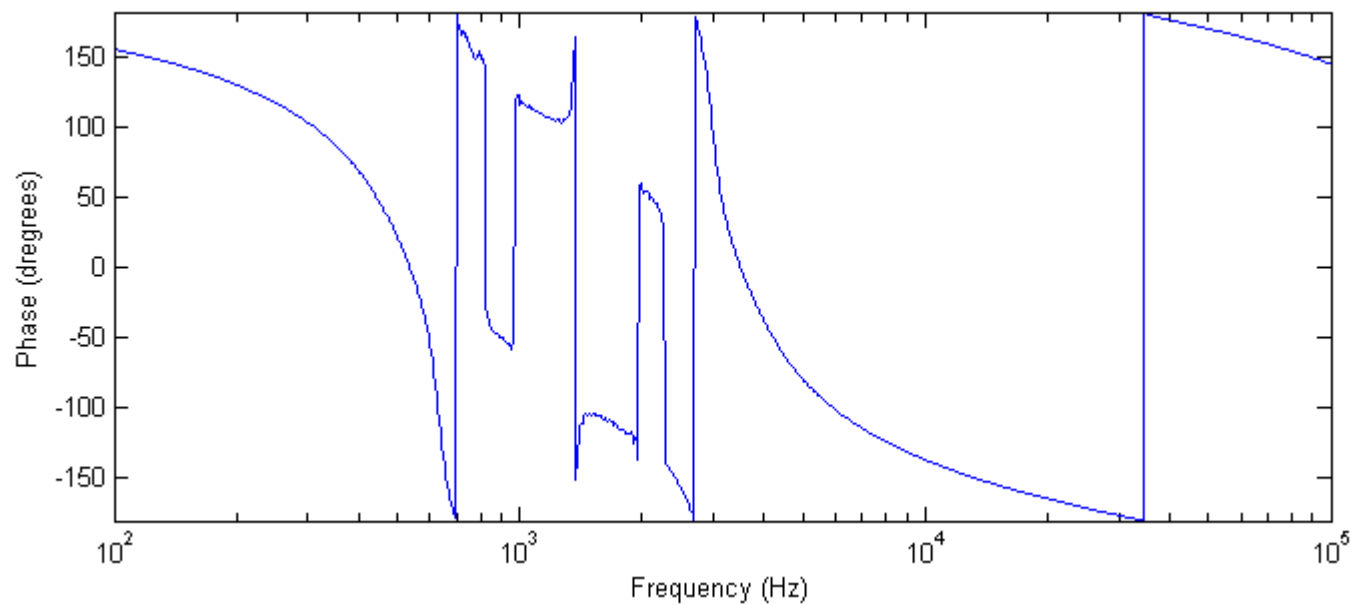


Figure 21: Fase medida

7.2. Respuesta al escalón

Ingresando al circuito con un escalón de baja frecuencia

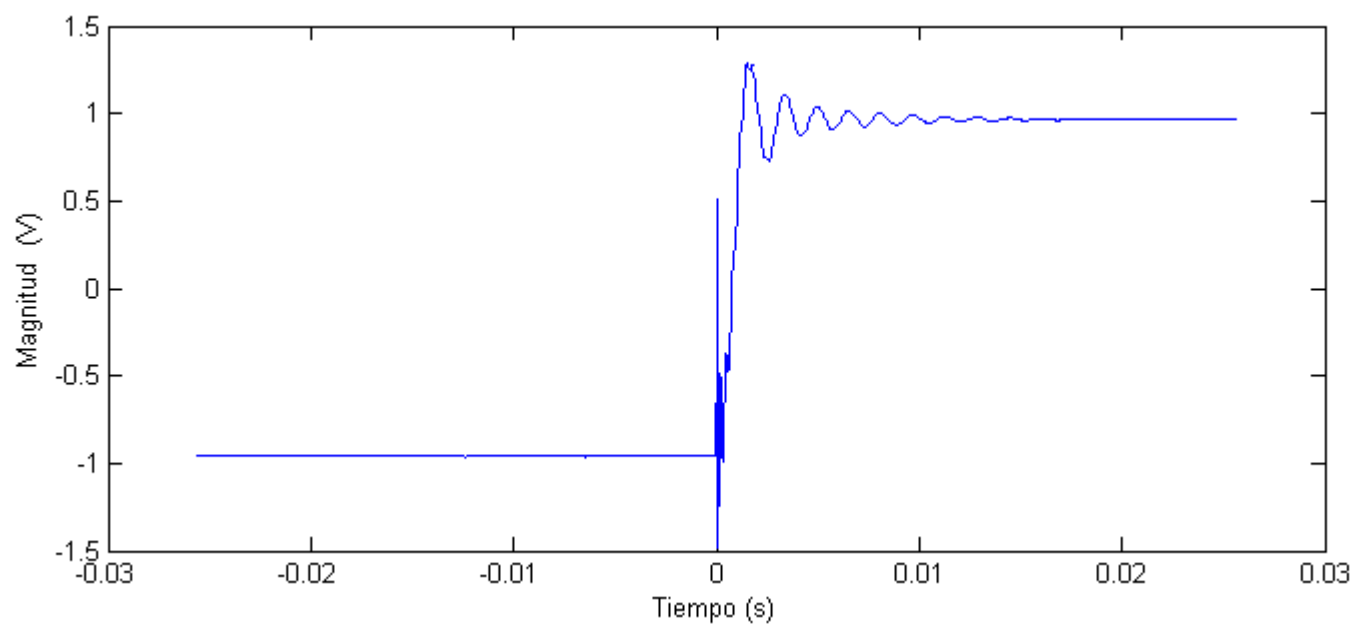


Figure 22: Respuesta al escalón medido

8. Análisis de Costos de Componentes

Se optó por emplear resistores y capacitores SMD, esto fue con el fin de minimizar tanto costos debido al tamaño de placa a emplear como costo por unidad de componente. Además, permitió minimizar la dispersión debido a la tolerancia de componentes empleados, se utilizaron resistencias con tolerancia al 1% y capacitores al 5%. A continuación en el cuadro 6 se encuentra la cantidad de cada componente empleado y costo promedio por unidad en el panel. Para reducir costos se emplearon integrados con cuatro canales, es decir cuatro OpAmps por chip optando entonces por el integrado TL074.

Se incluyó en el cuadro 7 el costo de la etapa opcional de ganancia, llegando de esta forma a un costo total de 4,455 U\$D y 4,175 U\$D con y sin etapa de ganancia respectivamente. Los costos calculados no incluyen el estaño empleado ni el costo de tamecos que fueron reutilizados de trabajos previos.

Componente	Costo Por unidad(U\$D)	Cantidad Total	Costo Total(U\$D)
Resistencias	0,00644	120	0,7728
Capacitores	0,012	20	0,24
Integrado TL074	0,24	5	1,2
Placa Doble Paz 10x10	1,942	1	1,942
Pines Rectos Comunes	0.00966	20	0,01932
Costo Total	-	-	4,17412

Table 6: Costo Total del PCB sin agregados

Componente	Costo Por unidad(U\$D)	Cantidad Total	Costo Total(U\$D)
Resistencias	0,00644	6	0,03864
Capacitores	0,012	1	0,012
Integrado TL072	0.23	1	0.23
Costo Total Etapa Ganancia	-	-	0,28064
Costo Total			4,45476

Table 7: Costo Total de Etapa Opcional de Ganancia

9. Conclusión

Se pudo diseñar un filtro rechaza-banda cumpliendo los requerimientos mencionados al comienzo de éste trabajo. Se evaluaron distintas formas de diseñar con diferentes celdas, siendo la Flescher-Tow la que mejor resultado dió, y por cuestiones de diseño también, se decidió implementar éste tipo de celdas. Además se realizó un análisis de costos del filtro en el cual se verificó que utilizando resistencias smd, no sólo se baja la tolerancia del circuito, sino que también se pudo realizar en una placa mas pequeña lo que bajó considerablemente los costos.

Resumen

Se llevo a cabo el diseño de un filtro rechaza banda que cumpla con los requisitos de una plantilla, para esto se debe tomar en cuenta la dispersión producida por la tolerancia de los componentes. Para lograr que el cumplimiento de la plantilla no dependa de la tolerancia de los componentes se deben tomar márgenes, diseñando de esta manera para una plantilla más estricta. Los valores teóricos y prácticos tomados para el diseño se pueden observar en el cuadro 8

Aproximación	Cauer	Aproximación	Cauer
A_p	2 dB	A_p	0.4 dB
A_a	45 dB	A_a	52.9 dB
f_p^-	600 Hz	f_p^-	600 Hz
f_a^-	800 Hz	f_a^-	800 Hz
f_a^+	2300 Hz	f_a^+	2300 Hz
f_p^+	3000 Hz	f_p^+	3000 Hz
Notch depth	55 dB	Gain	-0.2 dB
Orden	8	Notch depth	55 dB
		Orden	10

Table 8: Resumen: Requisito de Diseño Teórico y Prácticos Respectivamente

A partir de la plantilla de diseño se obtuvieron una serie de polos y ceros, debido a la aproximación de Cauer empleada se obtuvieron ceros de transmisión. Esto limito la posible elección de celdas, optando finalmente por la Celda Flecher-Tow, que consiste en una celda universal con baja sensibilidad y la característica de poder realizar ajuste que dependan de menos componentes que otros celdas, a diferencia de por ejemplo la Sedra, esto permitió fijar los valores de capacitores y agrupar solamente las resistencias simplificando considerablemente la materialización del PCB.

Una vez diseñadas las etapas, se ordenaron para maximizar el rango dinámico del filtro, debido a que se trataba de un filtro con gran nivel de atenuación y cuatro notches se considero para alta señal. Por este motivo se ordenaron las etapas de polos de mayor factor de calidad (Q) a menor, buscando evitar que la señal caiga por debajo del piso del ruido.

En cuanto a la realización del PCB se optó por el uso de resistores y capacitores SMD con el fin de minimizar espacio, costo y la tolerancia de los componentes. Esto permitió llevar a cabo el filtro con sus cinco etapas y una etapa opcional de ganancia en una placa de 10cmsx10cms. El PCB final sin etapa de ganancia costó U\$D 4,175 y se puede observar en las siguientes figuras:

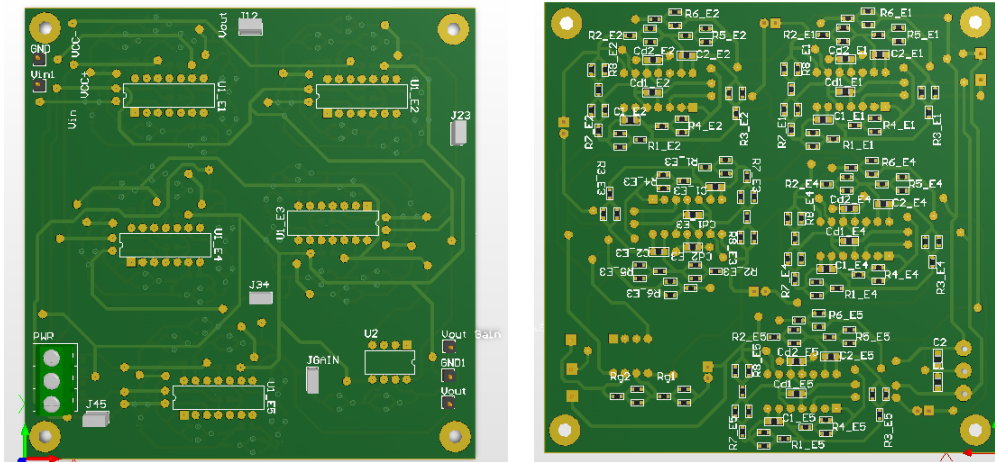


Figure 23: Diseño PCB Final