

# Diseño de filtros

## Trabajo Práctico de Laboratorio 4

Integrantes: Clemenz, Jeremías Ezequiel  
Gallardo, Nicolás  
Recalde, Santiago  
Villar, Federico Ignacio

Profesores: Ferreyra, Pablo  
Reale, César

Fecha de entrega: 1 de diciembre de 2023  
Córdoba, Argentina



## Índice

1	Objetivos . . . . .	3
2	Desarrollo . . . . .	3
2.1	Aproximacion de la funcion transferencia . . . . .	3
2.2	Sintesis del circuito . . . . .	4
2.2.1	Sintesis del filtro pasa bajo . . . . .	5
2.2.2	Sintesis del filtro pasa alto . . . . .	8
3	Simulaciones en LTSpice . . . . .	11
3.1	Simulacion de la etapa pasa bajo . . . . .	11
3.2	Simulacion de la etapa pasa alto . . . . .	12
3.3	Simulacion del circuito completo . . . . .	12
4	Calculo de sensibilidad . . . . .	13
4.1	Sensibilidad de $\omega_p$ . . . . .	13
4.2	Sensibilidad de $\omega_p/Q_P$ . . . . .	14
5	Analisis de la peor desviacion de tolerancias . . . . .	14
6	Simulacion montecarlo . . . . .	15
7	Simulacion montecarlo con los valores del circuito montado . . . . .	16
8	Mediciones en el laboratorio y comparacion con las simulaciones . . . . .	18
9	Conclusiones . . . . .	19

## 1 Objetivos

En base a la planilla de requerimientos suministrada, sintetizar un circuito basado en amplificadores operacionales que satisfaga esos requisitos.

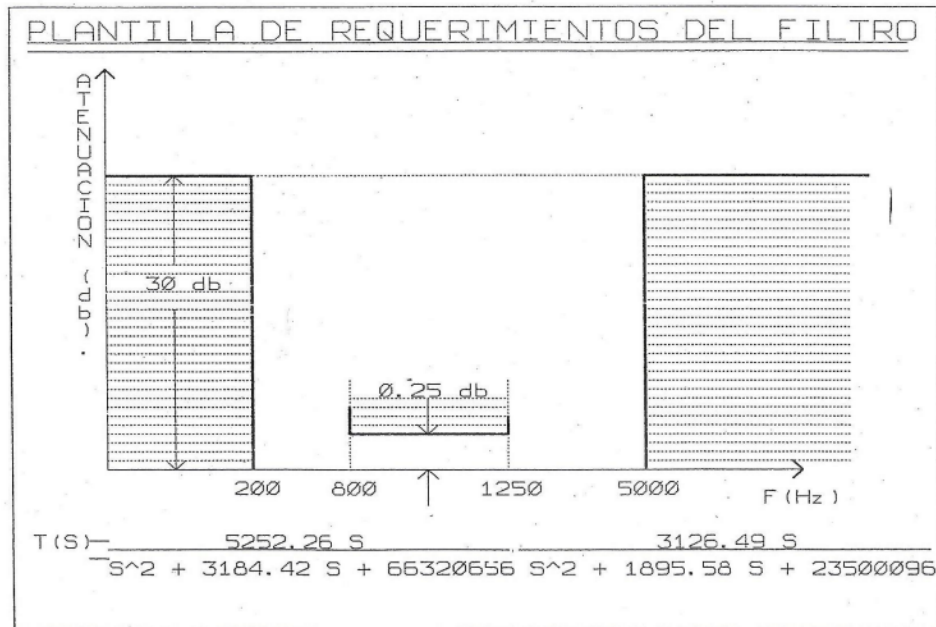


Figura 1: Requerimientos del circuito

## 2 Desarrollo

En base a la planilla de requerimientos suministrada se pide lo siguiente:

### 2.1 Aproximación de la función de transferencia

En este punto tendremos que aproximar la función de atenuación mediante polinomios de Chebyshev, utilizando MatLab. Con los datos especificados en el diagrama, encontraremos una función de transferencia que se ajuste a los requerimientos mediante dos funciones que ofrece MatLab, `cheby1` y `cheb1ord`. Estas funciones nos permiten obtener los coeficientes de la función de transferencia.

Las especificaciones son las siguientes:

- $f_p = 800$  a  $1250$  Hz (Banda de paso)
- $f_a = 0$  a  $200$  Hz y desde  $5000$  Hz (Banda de atenuación)
- $A_p = 0.25$  dB (atenuación máxima en banda de paso)
- $A_a = 30$  dB (atenuación mínima en banda de rechazo)

Con estos datos podemos obtener el orden de la aproximación de Chebyshev de tipo 1 mediante la función `cheb1ord`. Finalmente el orden obtenido es:

$$n = 2 \quad (1)$$

Y el  $\omega_p$  (frecuencia de corte) es:

$$\omega_p = [2\pi 800, 2\pi 1250] \quad (2)$$

Mediante la funcion cheby1 podemos obtener los coeficientes de la funcion de transferencia. Ingresando el orden, la atenuacion maxima y la frecuencia de corte obtenemos los coeficientes de la funcion de transferencia:

$$H(s) = \frac{1,642 \times 10^7 s^2}{s^4 + 5080s^3 + 9,586 \times 10^7 s^2 + 2,006 \times 10^{11} s + 1,559 \times 10^{15}} \quad (3)$$

El bode de esta funcion de transferencia es el siguiente:

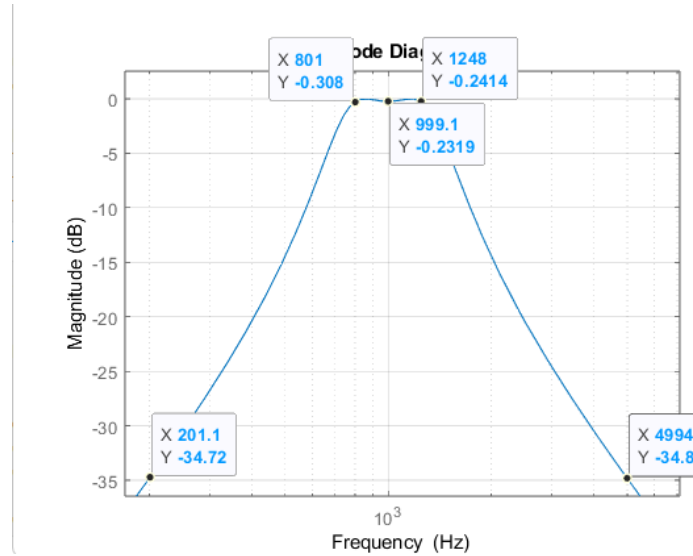


Figura 2: Bode de la función de transferencia del filtro

## 2.2 Síntesis del circuito

Observando la funcion de transferencia obtenida, podemos ver que se trata de un filtro pasa banda de orden 4. Por lo tanto utilizaremos dos funciones bicuadraticas para sintetizar el circuito. Una bicuadratica sera un filtro pasa bajo y otra pasa alto. Mediante la funcion tf2sos (funcion de transferencia a sistema de segundo orden) obtenemos la forma de las bicuadraticas:

$$H_{pasabaja}(s) = \frac{3,284 \times 10^7}{s^2 + 3184s + 6,632 \times 10^7} \quad (4)$$

$$H_{pasaalto}(s) = \frac{0,5s^2}{s^2 + 1896s + 2,35 \times 10^7} \quad (5)$$

En la siguiente imagen observaremos en naranja y amarillo los filtros pasa bajo y pasa alto respectivamente:

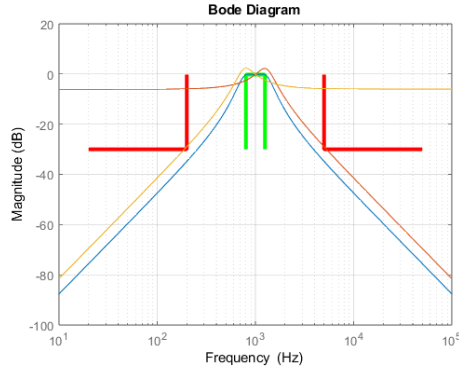


Figura 3: Bicuadráticas superpuestas

### 2.2.1 Síntesis del filtro pasa bajo

Para la síntesis de las funciones de transferencia utilizaremos el siguiente circuito, basados en los diseños de Sallen and Key. Primero empezaremos con el filtro pasa bajo:

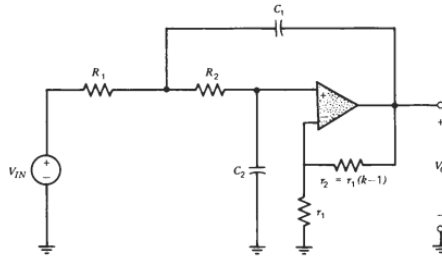


Figure 8.3 Low-pass Sallen and Key circuit.

Figura 4: Circuito Sallen and Key pasa bajo

Realizando el metodo de nodos obtenemos la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_2} + sC_1 & -\frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + sC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ sC_2 \cdot V_o + \frac{V_{in}}{R_1} \end{bmatrix}$$

Si tomamos  $R_1 = R_2 = R$  y  $C_1 = C_2 = C$ , y resolvemos por krammer obtenemos la siguiente funcion de transferencia de lazo cerrado:

$$T_{FB} = \frac{v^+}{v_{in}} = \frac{\frac{s}{RC}}{\frac{1}{(RC)^2} + \frac{3s}{RC} + s^2} \quad (6)$$

Si realizamos la transferencia de lazo abierto obtenemos la siguiente funcion de transferencia:

$$T_{FF} = \frac{v^+}{v_o} = \frac{\left(\frac{1}{RC}\right)^2}{\frac{1}{(RC)^2} + \frac{3s}{RC} + s^2} \quad (7)$$

Por lo tanto con estas dos funciones de transferencia podemos obtener la funcion de transferencia final del circuito. El denominador característico del circuito es el siguiente:

$$D(s) = \frac{1}{(RC)^2} + \frac{3s}{RC} + s^2 \quad (8)$$

El numerador de la funcion de transferencia de lazo cerrado es el siguiente:

$$N_{FB}(s) = \frac{s}{RC} \quad (9)$$

El numerador de la funcion de transferencia de lazo abierto es el siguiente:

$$N_{FF}(s) = \left(\frac{1}{RC}\right)^2 \quad (10)$$

Por lo tanto la funcion de transferencia final es la siguiente:

$$T(s) = \frac{k \cdot N_{FF}(s)}{D(s) - k \cdot N_{FB}(s)} \quad (11)$$

Resolviendo obtenemos:

$$T(s) = \frac{\left(\frac{k}{RC}\right)^2}{s^2 + \frac{(3-k)}{RC}s + \frac{1}{(RC)^2}} = \frac{k \cdot \omega_p^2}{s^2 + (3-k) \cdot \omega_p s + \omega_p^2} \quad (12)$$

Donde  $\omega_p$  es la frecuencia de corte del filtro. Por lo tanto podemos obtener los valores de R y C mediante igualacion. Ademas, k es la ganancia de lazo cerrado del circuito:

$$k = 1 + \frac{r_2}{r_1} \quad (13)$$

De la funcion de transferencia del pasabajo obtenemos que:

$$\frac{\omega_p}{Q_P} = \frac{(3-k)}{RC} = 3184 \quad (14)$$

$$\omega_p^2 = \frac{1}{(RC)^2} = 6,632 \times 10^7 \quad (15)$$

Si tomamos C = 1, obtenemos:

$$\omega_p = \frac{1}{R} = 8143,71 \quad (16)$$

Despejando R obtenemos:

$$R = 1,23 \times 10^{-4} \Omega \quad (17)$$

Para obtener los demás parámetros tenemos que calcular  $Q_P$ , que se calcula de la siguiente manera:

$$Q_P = \frac{\omega_p}{3184} = 2,56 \quad (18)$$

Con  $Q_P$  podemos obtener k, que nos permitirá obtener  $r_1$  y  $r_2$ :

$$\frac{\omega_p}{Q_P} = \frac{(3-k)}{RC} = (3-k) \cdot \omega_p \quad (19)$$

Como tenemos que  $R = 1,23 \times 10^{-4} \Omega$  y  $C = 1$ , despejamos k:

$$k = 3 - \frac{1}{Q_P} = 2,61 \quad (20)$$

Por lo tanto:

$$r_2 = 1,61 \cdot r_1 \quad (21)$$

Si tomamos a  $r_2 = 10k\Omega$ , obtenemos que  $r_1 = 6,2k\Omega$ . Ademas podemos escalar el valor de R y C, ya que los valores obtenidos no son valores comerciales. Por lo tanto, si tomamos  $C = 100nF$ :

$$R = 1,23 \times 10^{-6} \cdot 10^6 = 1,23k\Omega \quad (22)$$

Como ultimo paso evaluamos la ganancia de la funcion de transferencia que tiene que valer 32840000. Calculandola:

$$k \cdot \omega_p^2 = 2,61 \cdot 8143,71^2 = 173,1 \times 10^6 \neq 32840000 \quad (23)$$

Para solucionar este problema agregaremos un divisor resistivo que funcionara como atenuador de la señal. Tenemos que tener en cuenta que la impedancia vista desde ese punto tiene que valer R y la atenuacion tiene que ser:

$$G_{\text{atenuacion}} = \frac{32840000}{173,1 \times 10^6} = 0,19 \quad (24)$$

Y ademas la impedancia vista desde ese punto es:

$$R = \frac{R_A \cdot R_B}{R_A + R_B} \quad (25)$$

Resolviendo y simplificando obtenemos:

$$R_A = \frac{R}{G_{\text{atenuacion}}} = 6,47k\Omega \quad (26)$$

$$R_B = \frac{R}{1 - G_{\text{atenuacion}}} = 1,52k\Omega \quad (27)$$

Finalmente obtenemos los parametros del filtro pasa bajo:

- $r_1 = 6,2 k\Omega$
- $r_2 = 10 k\Omega$
- $R_1 = 1,23 k\Omega$
- $R_2 = 1,23 k\Omega$
- $C_1 = 100 nF$
- $C_2 = 100 nF$
- $R_A = 6,47 k\Omega$
- $R_B = 1,52 k\Omega$



El circuito final es el siguiente:

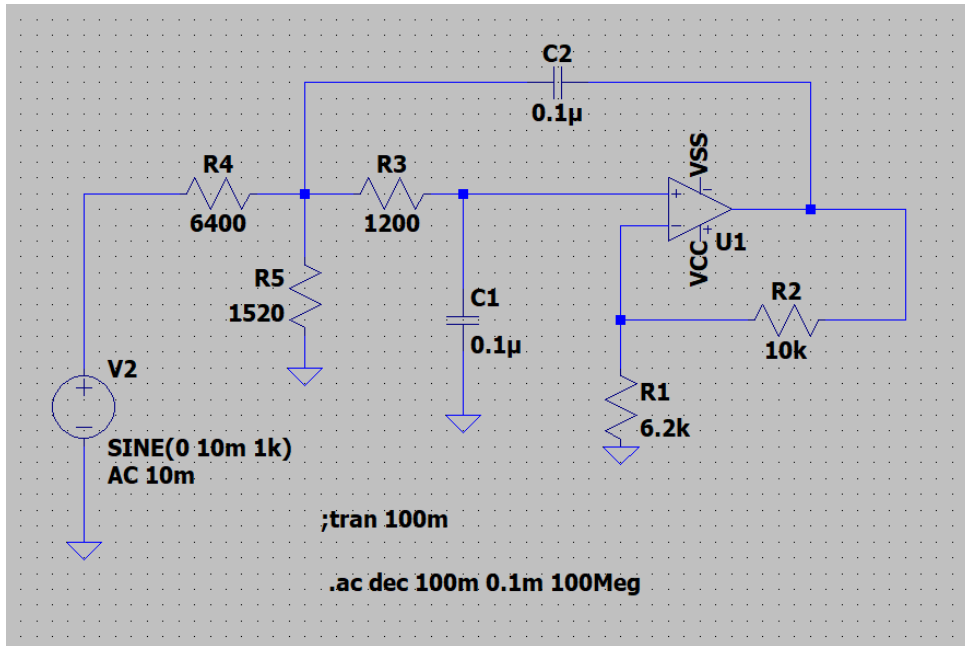


Figura 5: Circuito Sallen and Key pasa bajo final

### 2.2.2 Síntesis del filtro pasa alto

Para la síntesis del filtro pasa alto utilizaremos el siguiente circuito:

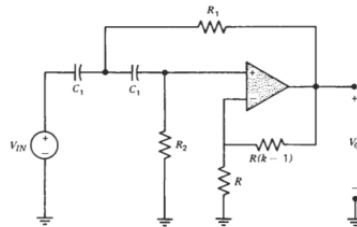


Figura 6: Circuito Sallen and Key pasa alto

Realizando el metodo de nodos obtenemos la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_2} + sC_2 & -sC_2 \\ -sC_2 & \frac{1}{R_1} + sC_2 + sC_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ sC_1 \cdot V_{in} + \frac{V_o}{R_1} \end{bmatrix}$$

Si tomamos  $R_1 = R_2 = R$  y  $C_1 = C_2 = C$ , y resolvemos por krammer obtenemos la siguiente funcion de transferencia de lazo cerrado:

$$T_{FB} = \frac{v^+}{v_{in}} = \frac{\frac{s}{RC}}{\frac{1}{(RC)^2} + \frac{3s}{RC} + s^2} \quad (28)$$

Si realizamos la transferencia de lazo abierto obtenemos la siguiente funcion de transferencia:

$$T_{FF} = \frac{v^+}{v_o} = \frac{s^2}{\frac{1}{(RC)^2} + \frac{3s}{RC} + s^2} \quad (29)$$

Ahora podemos obtener la funcion de transferencia final del circuito:

$$T(s) = \frac{k \cdot N_{FF}(s)}{D(s) - k \cdot N_{FB}(s)} \quad (30)$$

Donde el denominador caracteristico del circuito es el siguiente:

$$D(s) = \frac{1}{(RC)^2} + \frac{3s}{RC} + s^2 \quad (31)$$

El numerador de la funcion de transferencia de lazo cerrado es el siguiente:

$$N_{FB}(s) = \frac{s}{RC} \quad (32)$$

El numerador de la funcion de transferencia de lazo abierto es el siguiente:

$$N_{FF}(s) = s^2 \quad (33)$$

Por lo tanto la funcion de transferencia final es la siguiente:

$$T(s) = \frac{k \cdot s^2}{s^2 + (3 - k) \cdot \omega_p s + \omega_p^2} = \frac{k \cdot s^2}{s^2 + \frac{(3-k)}{RC} s + \frac{1}{(RC)^2}} \quad (34)$$

Donde  $\omega_p$  es la frecuencia de corte del filtro. Por lo tanto podemos obtener los valores de R y C mediante igualacion. Ademas, k es la ganancia de lazo cerrado del circuito:

$$k = 1 + \frac{r_2}{r_1} \quad (35)$$

De la funcion de transferencia del pasa alto obtenemos que:

$$\frac{\omega_p}{Q_P} = \frac{(3 - k)}{RC} = 1896 \quad (36)$$

$$\omega_p^2 = \frac{1}{(RC)^2} = 2,35 \times 10^7 \quad (37)$$

Si tomamos  $C = 1$ , obtenemos:

$$\omega_p = \frac{1}{R} = 4847,7 \quad (38)$$

Despejando R obtenemos:

$$R = 2,06 \times 10^{-4} \Omega \quad (39)$$

Calculamos  $Q_P$ :

$$Q_P = \frac{\omega_p}{1896} = 2,44 \quad (40)$$

Con  $Q_P$  podemos obtener k, que nos permitirá obtener  $r_1$  y  $r_2$ :

$$\frac{\omega_p}{Q_P} = \frac{(3 - k)}{RC} = (3 - k) \cdot \omega_p \quad (41)$$

Como tenemos que  $R = 2,06 \times 10^{-4} \Omega$  y  $C = 1$ , despejamos k:

$$k = 3 - \frac{1}{Q_P} = 2,59 \quad (42)$$

Por lo tanto:

$$r_2 = 1,59 \cdot r_1 \quad (43)$$

Si tomamos a  $r_2 = 10k\Omega$ , obtenemos que  $r_1 = 6,2k\Omega$ . Ademas podemos escalar el valor de R y C, ya que los valores obtenidos no son valores comerciales. Por lo tanto, si tomamos  $C = 10nF$ :

$$R = 2,06 \times 10^{-5} \cdot 100 \cdot 10^6 = 20,63k\Omega \quad (44)$$

Como ultimo paso evaluamos la ganancia de la funcion de transferencia que tiene que valer 0.5. Calculandola:

$$k = 2,59 \neq 0,5 \quad (45)$$

Por lo tanto la ganancia de atenuacion tiene que ser:

$$G_{\text{atenuacion}} = \frac{0,5}{2,59} = 0,19 \quad (46)$$

Lo ideal en terminos economicos para solucionar este problema es agregar un divisor de tension. Pero el problema es que se tendria que realizar con capacitores, y comercialmente no hay gran variedad como si lo hay con resistencias. Ademas, en el trabajo practico se esta utilizando un amplificador operacional LM324, que cuenta con 4 amplificadores operacionales en el mismo encapsulado. Por lo tanto, los dos amplificadores operacionales que sobran se utilizaran para realizar el divisor de tension y ademas adaptar la impedancia entre etapas del circuito. Por lo tanto, el circuito de los divisores mas el circuito pasa alto quedaria de la siguiente manera:

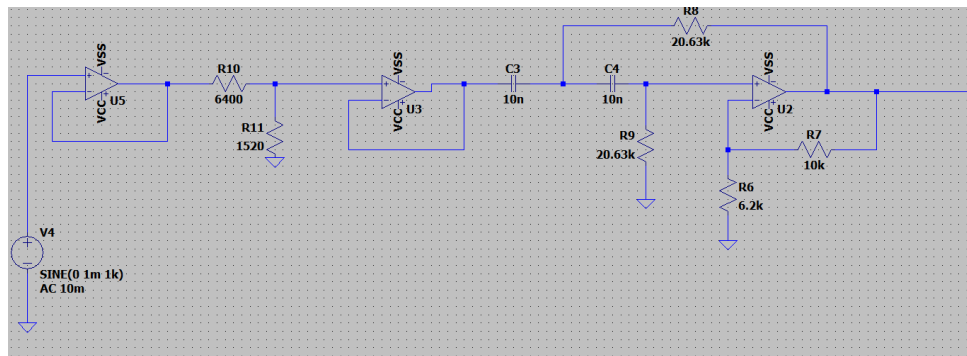


Figura 7: Circuito Sallen and Key pasa alto final

Y los componentes son los siguientes:

- $r_1 = 6,2 k\Omega$
- $r_2 = 10 k\Omega$
- $R_1 = 20,63 k\Omega$
- $R_2 = 20,63 k\Omega$
- $C_1 = 10 nF$
- $C_2 = 10 nF$
- $R_A = 6,47 k\Omega$
- $R_B = 1,52 k\Omega$

### 3 Simulaciones en LTSpice

En este apartado se presentan las simulaciones realizadas en LTSpice para verificar el correcto funcionamiento del circuito. Realizaremos de cada etapa y del circuito completo.

#### 3.1 Simulacion de la etapa pasa bajo

Simulamos la etapa pasa bajo con una entrada de 1Vpp y una frecuencia de 1kHz. El resultado es el siguiente:

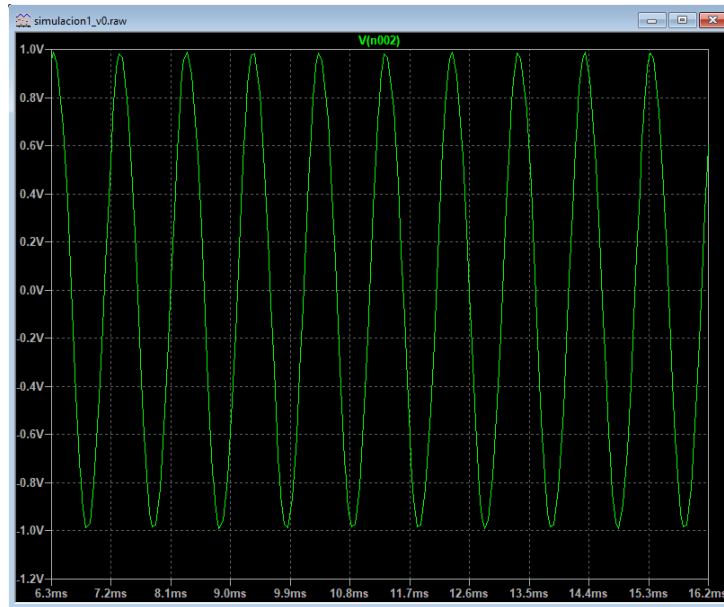


Figura 8: Simulacion de la etapa pasa bajo

Y realizando el bode de la simulacion obtenemos:

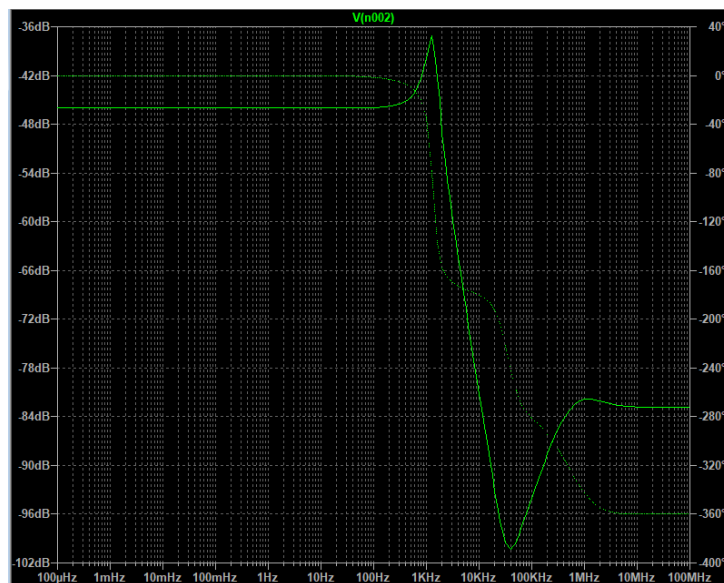


Figura 9: Bode de la simulacion de la etapa pasa bajo

### 3.2 Simulacion de la etapa pasa alto

Simulamos la etapa pasa alto con una entrada de 1Vpp y una frecuencia de 1kHz. El resultado es el siguiente:

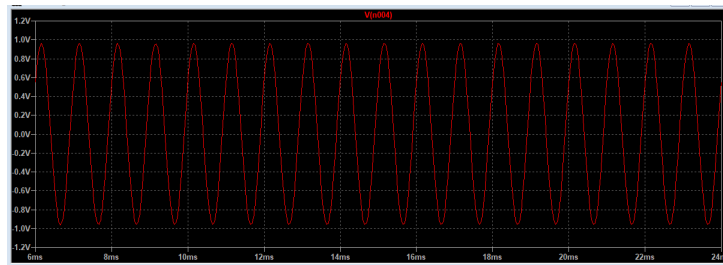


Figura 10: Simulacion de la etapa pasa alto

Y realizando el bode de la simulacion obtenemos:

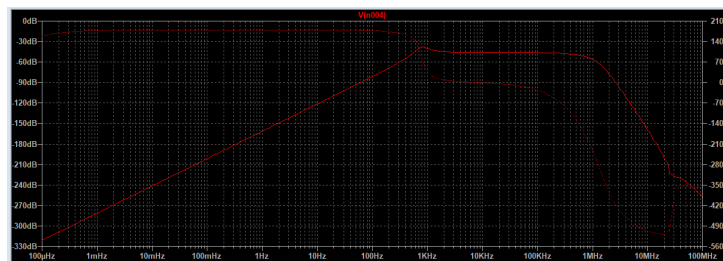


Figura 11: Bode de la simulacion de la etapa pasa alto

En el bode de la simulacion podemos observar que al alcanzar los 1 MHz la ganancia cae abruptamente. Esto se debe a que el amplificador operacional LM324 tiene un ancho de banda de 1 MHz. Por lo tanto, para frecuencias mayores a 1 MHz el amplificador operacional no funciona correctamente.

### 3.3 Simulacion del circuito completo

Simulamos el circuito completo con una entrada de 1Vpp y una frecuencia de 1kHz. El resultado es el siguiente:

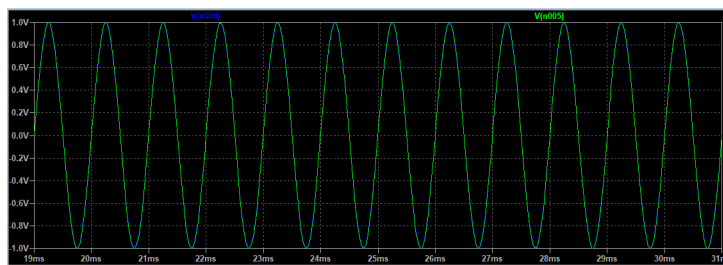


Figura 12: Simulacion del circuito completo

Y realizando el bode de la simulacion obtenemos:

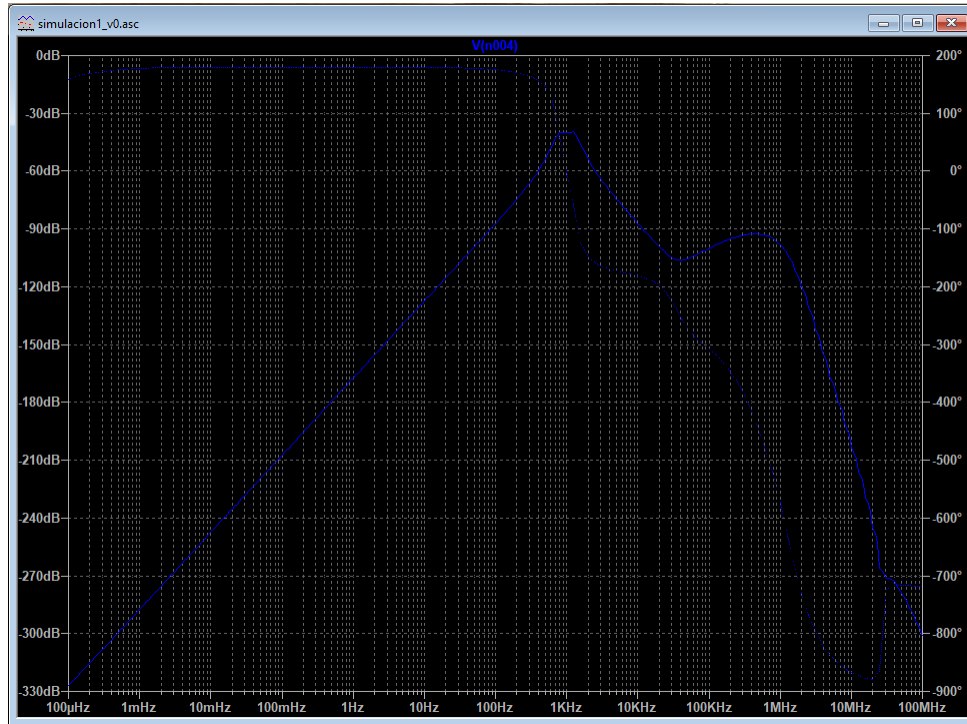


Figura 13: Bode de la simulacion del circuito completo

Lo mas importante de la simulacion es que el circuito cumple con los requerimientos especificados en la planilla de requerimientos, que son los siguientes:

- $f_p = 800$  a  $1250$  Hz (Banda de paso)
- $f_a = 0$  a  $200$  Hz y desde  $5000$  Hz (Banda de atenuacion)
- $A_p = 0.25$  dB (atenuacion maxima en banda de paso)
- $A_a = 30$  dB (atenuacion minima en banda de rechazo)

## 4 Calculo de sensibilidad

En este apartado se calculara la sensibilidad de la frecuencia de polo de cada bicuadratica ( $\omega_p$ ) y del ancho de banda ( $BW$ ).

### 4.1 Sensibilidad de $\omega_p$

Para calcular la sensibilidad de  $\omega_p$  con respecto a  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  y  $C_2$  utilizaremos la siguiente formula:

$$S_{R_1 R_2 C_1 C_2}^{\omega_p} = \frac{R_1}{\omega_p} \cdot \frac{\partial \omega_p}{\partial R_1} + \frac{R_2}{\omega_p} \cdot \frac{\partial \omega_p}{\partial R_2} + \frac{C_1}{\omega_p} \cdot \frac{\partial \omega_p}{\partial C_1} + \frac{C_2}{\omega_p} \cdot \frac{\partial \omega_p}{\partial C_2} \quad (47)$$

Desarrollando obtenemos lo siguiente:

$$S_{R_1}^{\omega_p} = \frac{R_1}{\omega_p} \cdot \frac{\partial \omega_p}{\partial R_1} = -0,5 \quad (48)$$

Para la sensibilidad de  $\omega_p$  con respecto a  $k$ :

$$S_k^{\omega_p} = \frac{k}{\omega_p} \cdot \frac{\partial \omega_p}{\partial k} = 0 \quad (49)$$

Por lo tanto concluimos que la sensibilidad de  $\omega_p$  con respecto a R1, R2, C1, C2 y k es la siguiente:

$$S_{R1R2C1C2k}^{\omega_p} = -0,5 \quad (50)$$

Y si algun componente varia un 1 %,  $\omega_p$  variara un 0.5 %.

## 4.2 Sensibilidad de $\omega_p/Q_P$

Para calcular la sensibilidad de  $\omega_p/Q_P$  con respecto a R, C y k utilizaremos la siguiente formula:

$$S_{RCk}^{\omega_p/Q_P} = \frac{R}{\omega_p/Q_P} \cdot \frac{\partial \omega_p/Q_P}{\partial R} + \frac{C}{\omega_p/Q_P} \cdot \frac{\partial \omega_p/Q_P}{\partial C} + \frac{k}{\omega_p/Q_P} \cdot \frac{\partial \omega_p/Q_P}{\partial k} \quad (51)$$

Y ademas  $\omega_p/Q_P$  se calcula de la siguiente manera:

$$\omega_p/Q_P = \frac{3-k}{RC} \quad (52)$$

Donde k es la ganancia de lazo cerrado del circuito. Desarrollando obtenemos lo siguiente:

$$S_R^{\omega_p/Q_P} = -(3-k) \cdot Q_P \quad (53)$$

$$S_C^{\omega_p/Q_P} = -(3-k) \cdot Q_P \quad (54)$$

$$S_k^{\omega_p/Q_P} = -k \cdot Q_P \quad (55)$$

Remplazando los valores obtenemos:

$$S_R^{\omega_p/Q_P} = -2,56 \cdot (3 - 2,61) = -1,01 \quad (56)$$

$$S_C^{\omega_p/Q_P} = -2,56 \cdot (3 - 2,61) = -1,01 \quad (57)$$

$$S_k^{\omega_p/Q_P} = -2,61 \cdot 2,56 = -6,7 \quad (58)$$

Por lo tanto concluimos que la sensibilidad de  $\omega_p/Q_P$  con respecto a R es -1.01, con respecto a C es -1.01 y con respecto a k es -6.7. Y si algun componente varia un 1 %,  $\omega_p/Q_P$  variara un 1.01 %, 1.01 % y 6.7 % respectivamente.

## 5 Analisis de la peor desviacion de tolerancias

En este apartado se analizara la peor desviacion de tolerancias de los componentes del circuito. Los peores casos son:

- $r_1$  y  $r_2$  aumentan su relacion variando k y por lo tanto  $\omega_p$  y  $\omega_p/Q_P$  varian.
- C varia maximamente y por lo tanto  $\omega_p$  y  $\omega_p/Q_P$  varian.
- R varia maximamente y por lo tanto  $\omega_p$  y  $\omega_p/Q_P$  varian.

Finalmente el circuito nos queda de la siguiente manera:

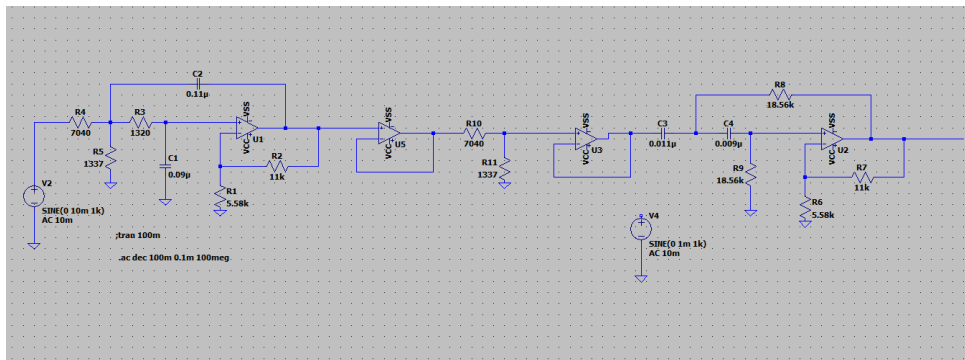


Figura 14: Circuito con la peor desviacion de tolerancias

Realizando el bode de la simulacion obtenemos:



Figura 15: Bode de la simulacion del circuito con la peor desviacion de tolerancias

Lo que sucede en el bode es que la frecuencia de corte del pasa bajo y del pasa alto varían. Por lo tanto, el ancho de banda también varía. Lo más notable es la variación de la banda de paso es de 700 Hz a 1400 Hz y no es uniforme en toda la banda. Por lo tanto, el filtro no cumple con todos los requisitos.

## 6 Simulacion montecarlo

En este apartado se realizará una simulación montecarlo para verificar que el circuito cumpla con los requisitos especificados en la planilla de requerimientos y observar cómo varía la frecuencia de corte y el ancho de banda del circuito dependiendo de las tolerancias de los componentes.

LTSpice nos brinda la posibilidad de realizar una simulación montecarlo. En esta simulación se puede variar la tolerancia de los componentes. En este caso se variará la tolerancia de los resistores y capacitores. La tolerancia de los resistores es del 5% y la de los capacitores es del 10%. Ingresando estas tolerancias en los componentes y utilizando la función montecarlo de LTSpice obtendremos lo siguiente:



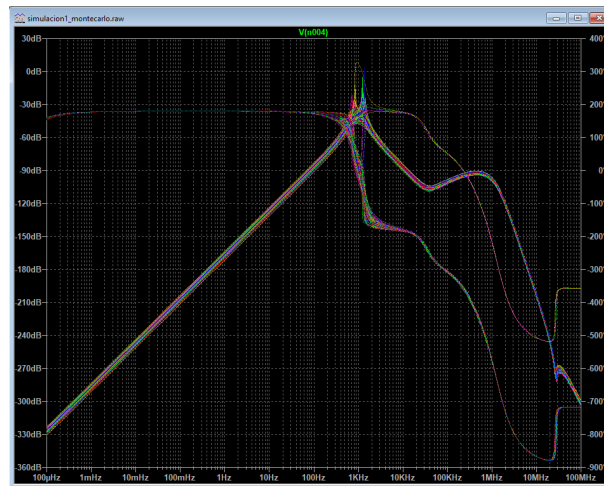


Figura 16: Simulacion montecarlo

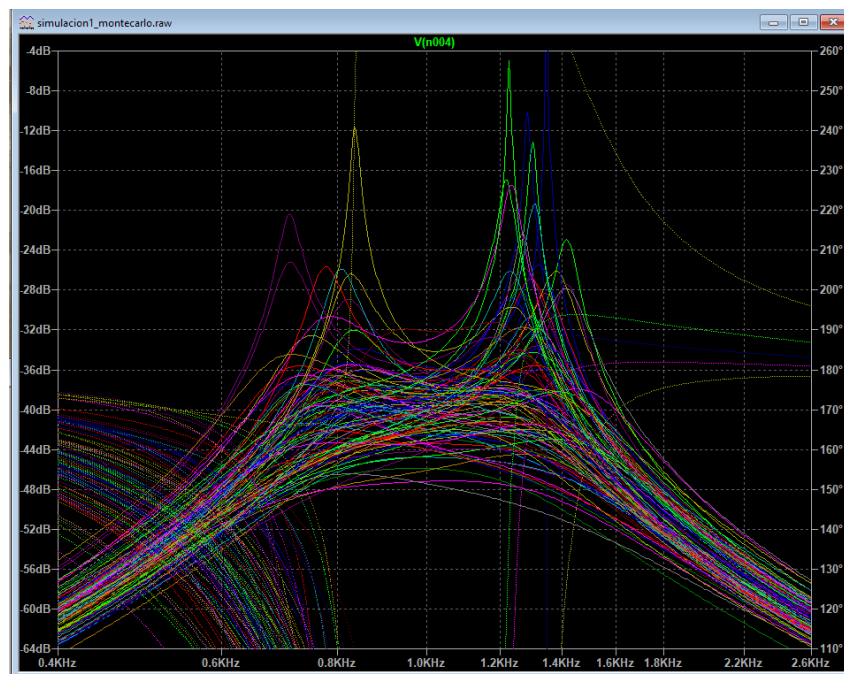


Figura 17: Simulacion montecarlo con mas detalle en la banda de paso

Realizamos 100 simulaciones ya que es un numero suficiente para observar como varia la frecuencia de corte y el ancho de banda. En la imagen podemos observar que la frecuencia de corte varia entre 800 Hz y 1250 Hz.

Tenemos que tener en cuenta que estos resultados se dan para un circuito que tenga los valores exactos de los componentes. Pero cuando se monto fisicamente el circuito las sumas de las resistencias no son exactas. Por lo tanto, la frecuencia de corte y el ancho de banda varian. Lo ideal es tomar los valores del circuito montado y realizar una simulacion ideal y una simulacion montecarlo. De esta manera se puede observar como varia la frecuencia de corte y el ancho de banda en la realidad.

## 7 Simulacion montecarlo con los valores del circuito montado

En este apartado se realizara una simulacion montecarlo con los valores del circuito montado. Los valoresl filtro pasa bajo son los siguientes:

- $r_1 = 6,2 \text{ k}\Omega$

- $r_2 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_1 = 1220 \text{ k}\Omega$
- $R_A = 6470 \text{ k}\Omega$
- $R_B = 1500 \text{ k}\Omega$
- $C_1 = 100 \text{ nF}$
- $C_2 = 100 \text{ nF}$

Y los valores del filtro pasa alto son los siguientes:

- $r_1 = 6,2 \text{ k}\Omega$
- $r_2 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_1 = 20,7 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 20,7 \text{ k}\Omega$
- $C_1 = 10 \text{ nF}$
- $C_2 = 10 \text{ nF}$
- $R_A = 6390 \text{ }\Omega$
- $R_B = 1500 \text{ }\Omega$

El circuito tiene la misma conexión que el ideal pero los valores de los componentes son los del circuito montado. Realizando la simulación ideal y la simulación montecarlo obtenemos lo siguiente:

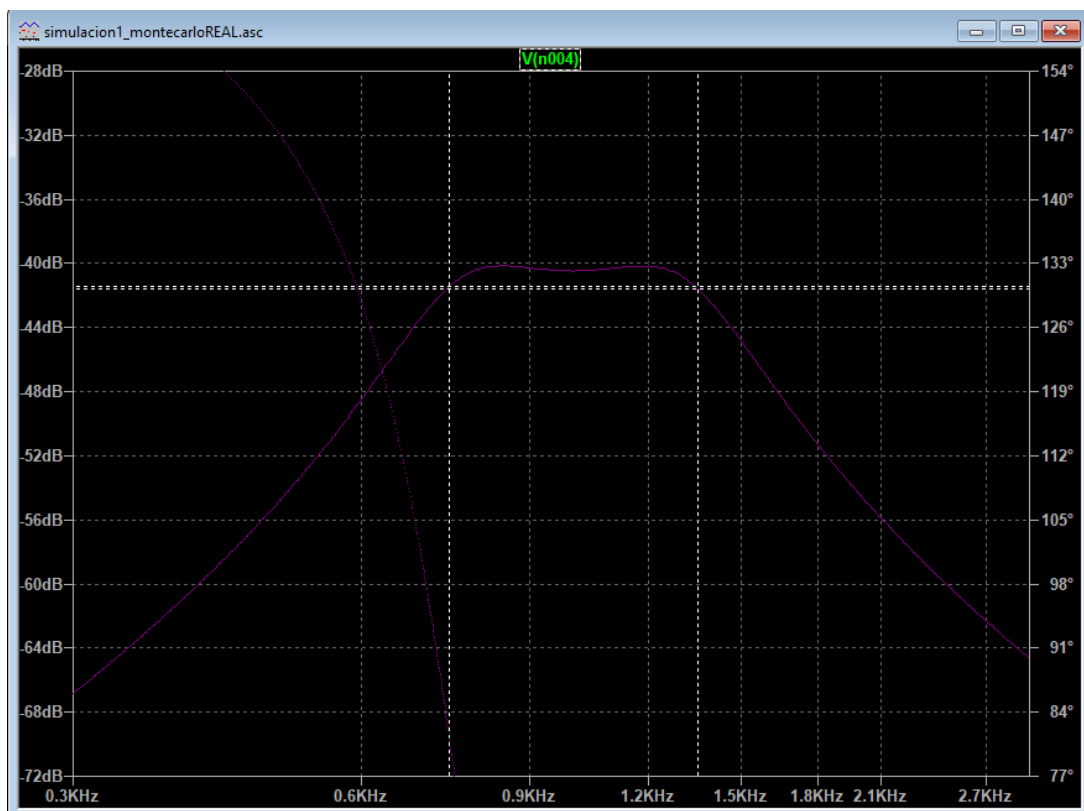


Figura 18: Simulación con los valores del circuito montado

Finalmente realizaremos un bode de la simulacion montecarlo para observar como varia la frecuencia de corte y el ancho de banda, para luego comparar con las mediciones tomadas en el laboratorio. El resultado es el siguiente:

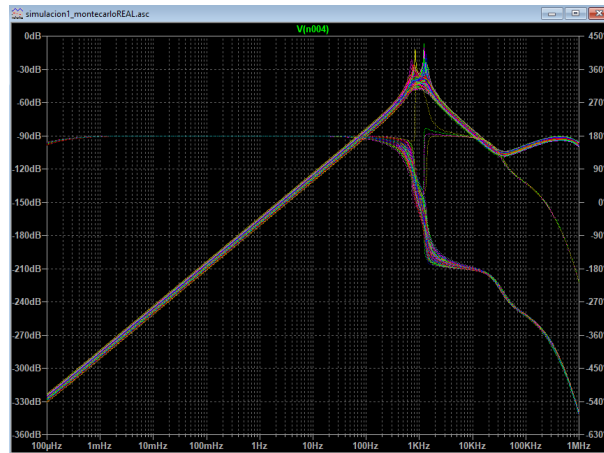


Figura 19: Bode de la simulacion montecarlo con los valores del circuito montado

Con mas detalle en la banda de paso:

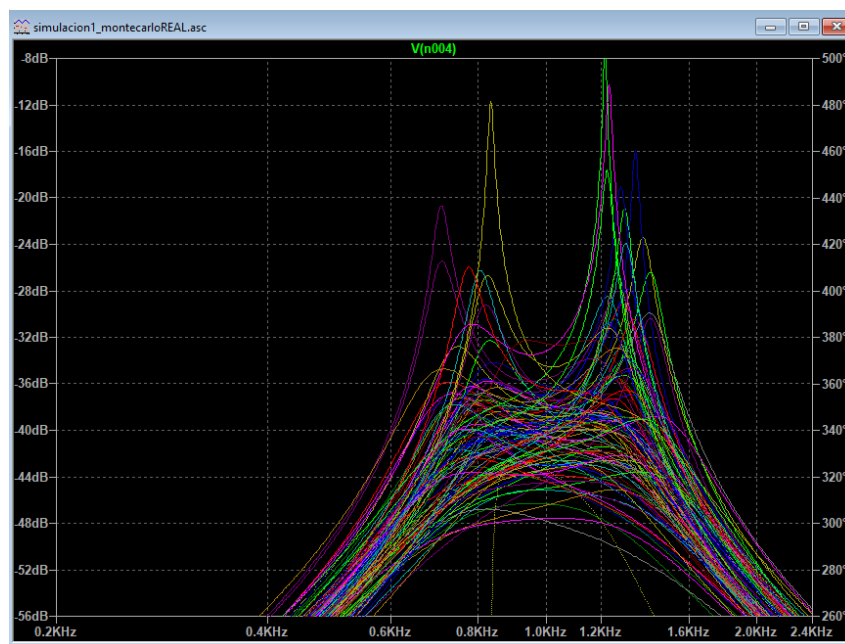


Figura 20: Bode de la simulacion montecarlo con los valores del circuito montado con mas detalle en la banda de paso

## 8 Mediciones en el laboratorio y comparacion con las simulaciones

Para esta seccion se armo el circuito y se midio experimentalmente la frecuencia de corte y el ancho de banda. Realizaremos un contraste entre las mediciones y las simulaciones:

	Simulacion	Medicion
<b>Frecuencia de corte inferior</b>	800 Hz	800 Hz
<b>Frecuencia de corte superior</b>	1250 Hz	1250 Hz
<b>Ancho de banda</b>	450 Hz	450 Hz
<b>Ganancia en banda de paso</b>	0.25 dB	0.25 dB
<b>Atenuacion en 200 Hz</b>	30 dB	30 dB
<b>Atenuacion en 5000 Hz</b>	30 dB	30 dB

Cuadro 1: Tabla de mediciones y simulaciones

## 9 Conclusiones

En este trabajo practico se realizo el diseño de un filtro pasa banda utilizando el metodo de Sallen and Key. Se realizo el diseño de la funcion de transferencia del circuito, se sintetizo el circuito y se calculo la sensibilidad de la frecuencia de corte y del ancho de banda. Luego se realizo una simulacion montecarlo para observar como varia la frecuencia de corte y el ancho de banda dependiendo de las tolerancias de los componentes. Finalmente se realizo el circuito y se midio la frecuencia de corte y el ancho de banda. Se comparo las mediciones con las simulaciones y se observo que