

Universidad Carlos III de Madrid

INFORME DEL TRABAJO DE EVALUACIÓN DEL BLOQUE 1

Diseño de circuitos electrónicos para comunicaciones

Autores:

Markel Serrano y Daniel Theran

11 de Octubre del 2022

Índice

1. Apartado 1	2
2. Apartado 2	2
3. Apartado 3	3
4. Apartado 4	4
5. Apartado 5	5
5.1. Función de transferencia de la etapa 2.	5
5.2. Función de transferencia de la etapa 3 o etapa integradora.	6
6. Apartado 6	7
7. Apartado 7	9
8. Apartado 8	9
8.1. Salida paso bajo del filtro (Vlp)	9
8.2. Salida paso banda del filtro (Vbp)	11
9. Apartado 9	12

1. Apartado 1

En este apartado se pedía diseñar un filtro paso bajo en **Matlab** de forma que contase con un polo en la frecuencia de 30KHz. Para ello, es necesario utilizar la función "tf", que calcula la función de transferencia en tiempo continuo ($H(s)$). Después, transformamos esta función en $H(z)$ mediante el uso del comando "c2d", que nos calcula la transformada Z de la función anterior. De esta forma, el código para generar las anteriores funciones, así como las variables necesarias y su correspondiente salida:

```
f0 = 30e3;  
w0 = 2* pi*f0;  
Q = 5;  
  
hs = tf([0, 0, w0^2],[1, w0/Q, w0^2])
```

```
hs =  
  
      3.553e10  
-----  
s^2 + 3.77e04 s + 3.553e10  
Continuous-time transfer function.
```

```
Ts = 1/1e6;  
hz = c2d(hs, Ts, 'impulse')
```

```
hz =  
  
      0.03466 z  
-----  
z^2 - 1.928 z + 0.963  
Sample time: 1e-06 seconds  
Discrete-time transfer function.
```

Figura 1: Entrada y salida del apartado 1 en Matlab

2. Apartado 2

En el segundo apartado se pide representar gráficamente ambas funciones. Para conseguir este objetivo se emplea la función "bode". De esta forma, la representación de la función de transferencia, tanto en tiempo continuo como en discreto, queda de la siguiente manera:

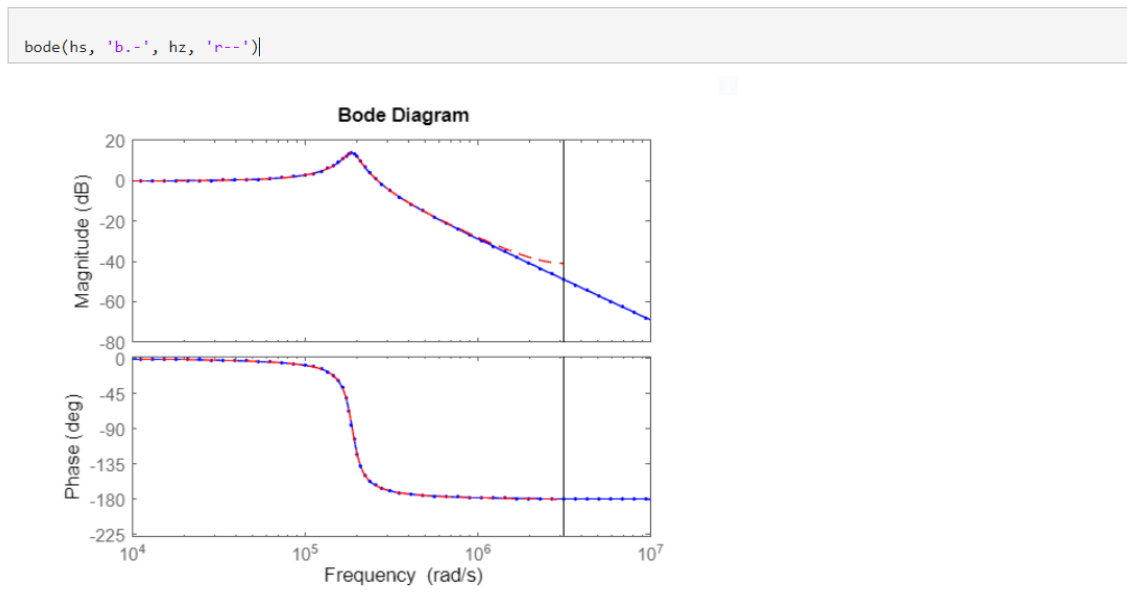


Figura 2: $H(s)$ y $H(z)$ representados en Matlab mediante su diagrama de bode

En la figura 1 podemos ver el módulo y fase del filtro completo. En la imagen de abajo (fase) se ve como al llegar los 45° en el módulo (imagen de arriba) tenemos un pico. Ésto corresponde a uno de los polos de funcionamiento del filtro paso bajo de segundo orden, es decir, a los 30 kHz que hemos puesto como polo en los datos del filtro.

3. Apartado 3

En esta sección se analiza tanto analíticamente como gráficamente, a través del software de simulación de circuitos **LTSpice**, una de las etapas del circuito completo dado en el ejercicio.

El fichero de simulación que se nos facilita corresponde a una de las etapas del circuito completo. Concretamente sería la etapa cuya salida corresponde a un filtro paso bajo (*Vlp*). Sin embargo, cuando se analiza por separado dicha etapa, se puede observar que tanto su función de transferencia como su análisis en **LTSpice**, corresponden con un filtro paso bajo.

La función de transferencia de ésta primera etapa del filtro, a la que se ha llamado $H_1(Z)$, es la siguiente:

$$H_1(Z) = \frac{C_1}{C_2 + C_7} \cdot \frac{Z^{-1}}{1 - \frac{C_2}{C_2 + C_7} \cdot Z^{-1}}$$

Figura 3: Función de transferencia de la primera etapa del circuito completo

Como se puede observar, da como resultante un filtro no inversor y con retardo, el cual nos afectará más adelante en la función de transferencia del circuito completo. El desarrollo de función de transferencia (3), se encuentra disponible en el Anexo I.

4. Apartado 4

Para encontrar la frecuencia de corte de la primera etapa, podemos optar por dos opciones: (1) mirar la entrada y la salida del filtro para diferentes frecuencias, y ver en cual de ellas estas dos señales están desfasadas 45° , pues ésto indica que para dicha frecuencia existiría un polo y por lo tanto también coincidiría con la frecuencia de corte dado que se trata de un filtro de primer orden; o (2) podemos utilizar los valores de los condensadores que vienen en el filtro y sustituirlos en la función de transferencia H_1 (3) y buscar el polo correspondiente igualando a cero el denominador.

Se ha optado por calcular de forma analítica la frecuencia de corte (opción 2) y, posteriormente, comprobar el valor obtenido de forma gráfica.

Al sustituir los condensadores C_2 y C_7 por sus valores en el filtro (20pF y 1pF respectivamente) e igualar el denominador a 0, obtenemos el siguiente valor:

$$1 - \frac{20pF}{20pF + 1pF} \cdot Z^{-1} = 0$$

$$Z = \frac{20pF}{1pF} \rightarrow Z = e^w$$

$$\ln(e^w) = \ln\left(\frac{20}{1}\right) \rightarrow w = 2\pi \cdot \frac{f_c}{f_s}$$

$$f_c = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{20}{1}\right)$$

$$f_c \approx 7,765kHz$$

Figura 4: Calculo de la frecuencia de corte de la primera etapa del filtro completo

Si cogemos dicha frecuencia resultante y la usamos para simular el comportamiento en la primera etapa, vemos entonces la siguiente salida:

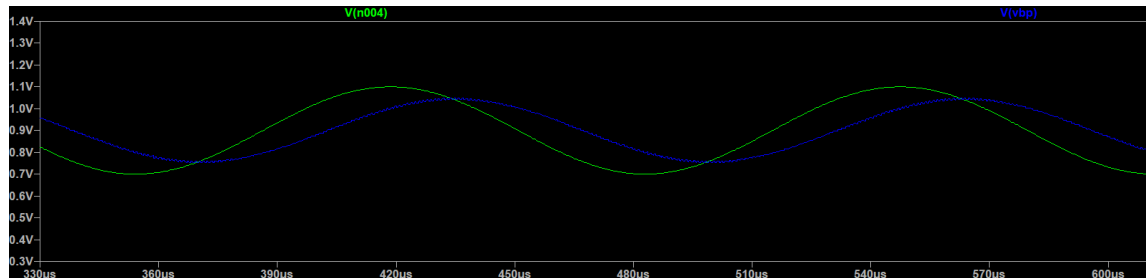


Figura 5: Desfase de 45° entre la señal de entrada y salida

Podemos observar entonces, que las señales de entrada y salida están desfasadas aproximadamente 45° entre sí.

5. Apartado 5

En esta sección se va a analizar de forma analítica la función de transferencia del circuito completo. Para ello primero tenemos que identificar qué otras etapas existen en el mismo y sacar sus correspondientes funciones de transferencia, de forma que finalmente, podamos analizar por bloques el funcionamiento completo del circuito y sacar la función de transferencia del mismo.

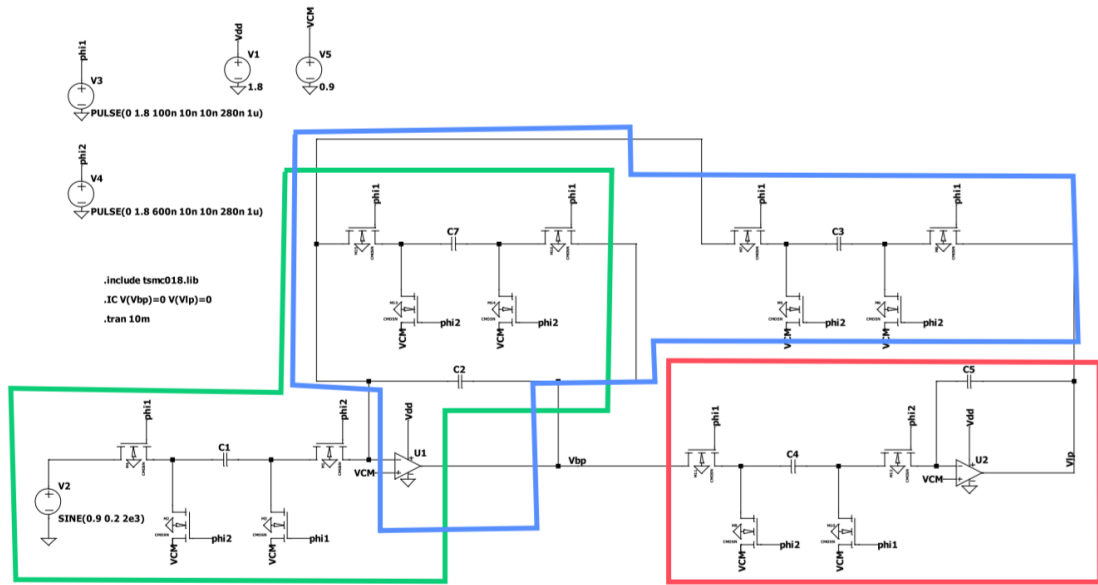


Figura 6: Etapas del circuito completo

En la figura 6 podemos diferenciar 3 etapas:

- **Integrador:** Enmarcada en rojo, es la correspondiente con la fase integradora del circuito
- **Filtro 1 (H_1):** Enmarcada en azul, es el correspondiente con la primera fase del filtro, el cual se ha analizado en el apartado 3.
- **Filtro 2 (H_2):** Enmarcada en verde, es otra etapa del circuito que, como veremos más adelante, corresponde con un filtro inversor sin retardo.

5.1. Función de transferencia de la etapa 2.

La función de transferencia de la etapa 2, a la que se ha llamado $H_2(Z)$, es la siguiente:

$$H_2(Z) = -\frac{C_3}{C_2+C_7} \cdot \frac{1}{1-\frac{C_2}{C_2+C_7} \cdot Z^{-1}}$$

Figura 7: Función de transferencia de la segunda etapa del circuito completo

Como se puede observar, da como resultante un filtro inversor y sin retardo. Esto hará posible que el funcionamiento del circuito completo tenga sentido y sea realizable. El desarrollo de función de transferencia (7), se encuentra disponible en el Anexo I.

5.2. Función de transferencia de la etapa 3 o etapa integradora.

La función de transferencia de la etapa 3, a la que se ha llamado $H_3(Z)$, es la siguiente:

$$H_3(Z) = \frac{C_4}{C_5} \cdot \frac{Z^{-1}}{1-Z^{-1}}$$

Figura 8: Función de transferencia de la tercera etapa del circuito completo

Se puede ver que se trata de un integrador ya que tiene un polo en 0 Hz (resolviendo el denominador) y aplica un retardo a la salida. Dicho retardo lo vamos a ver en la función de transferencia del circuito completo. El desarrollo de la función de transferencia de esta etapa (8), se encuentra disponible en el Anexo I.

Una vez calculada las funciones de transferencia de las 3 etapas que se pueden diferenciar en el circuito, debemos ver como es el funcionamiento completo del circuito mediante un diagrama de bloques.

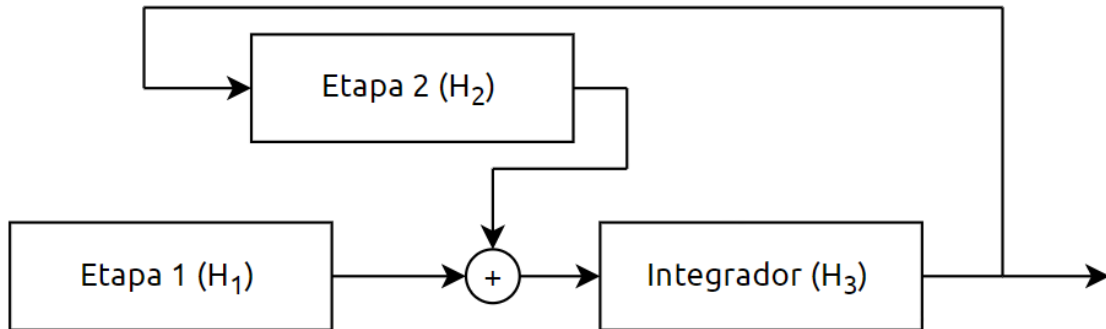


Figura 9: Bloques de funcionamiento del circuito

Si analizamos el funcionamiento interno entre estos bloques y vemos como interactúan las señales de entrada y salida de cada bloque, observamos que la función de transferencia completa del circuito es de la forma:

$$H(Z) = \frac{H_1 \cdot H_3}{1 - H_2 \cdot H_3}$$

Figura 10: Función de transferencia del circuito completo en bloques

Sustituyendo en los valores de H_1 , H_2 y H_3 en 10 y simplificando, obtenemos la siguiente función de transferencia:

$$H(Z) = \frac{C_1 C_4 \cdot Z^{-2}}{C_2 C_5 \cdot Z^{-2} + (C_4 C_3 - C_5 C_7 - 2C_5 C_2) \cdot Z^{-1} + C_5 (C_2 + C_7)}$$

Figura 11: Función de transferencia del circuito completo en Z inversa

Si resolvemos para tener términos en Z y no en Z inversa:

$$H(Z) = \frac{C_1 C_4}{C_5 (C_2 + C_7) \cdot Z^2 + (C_4 C_3 - C_5 C_7 - 2C_5 C_2) \cdot Z + C_2 C_5}$$

Figura 12: Función de transferencia del circuito completo

Donde los términos cuadráticos del denominador los llamamos **A**, los lineales **B** y el término independiente **C**. Ésto nos sirve para posterior mente fijar los valores de los condensadores de manera que obtengamos un filtro paso bajo con un comportamiento similar al filtro del apartado 1, es decir, con un polo de funcionamiento en 30 kHz.

La función de transferencia final queda entonces de la forma:

$$H(Z) = \frac{a_0}{A \cdot Z^2 + B \cdot Z + C}$$

Figura 13: Función de transferencia del circuito completo simplificada

Siendo las relaciones entre los coeficientes de la función y los condensadores, la siguiente:

- $a_0 \rightarrow C_1 C_4$
- $A \rightarrow C_5 (C_2 + C_7)$
- $B \rightarrow (C_4 C_3 - C_5 C_7 - 2C_5 C_2)$
- $C \rightarrow C_2 C_5$

En el apartado 7 veremos que para poder comparar los valores A, B y C de la función de transferencia total con el filtro obtenido en el apartado 1 (filtro de matlab), hay que normalizar los elementos de la función al término cuadrático del denominador.

6. Apartado 6

En este apartado se pedía separar la parte integradora y analizarla por separado, de forma que podamos analizar el error de carga que cae sobre el condensador de muestreo de forma gráfica. Para ello además de adaptar el circuito, fijamos el valor del condensador de integración (C_5) a 20pF, aumentamos amplitud la señal de entrada a 1.7 V ya que tendremos mayor error en ese caso, y aumentamos también la frecuencia de entrada a 1.5 MHz.

Con los valores anteriores y poniendo el con un valor de condensador de muestreo de 0.1pF, obtenemos el siguiente error:

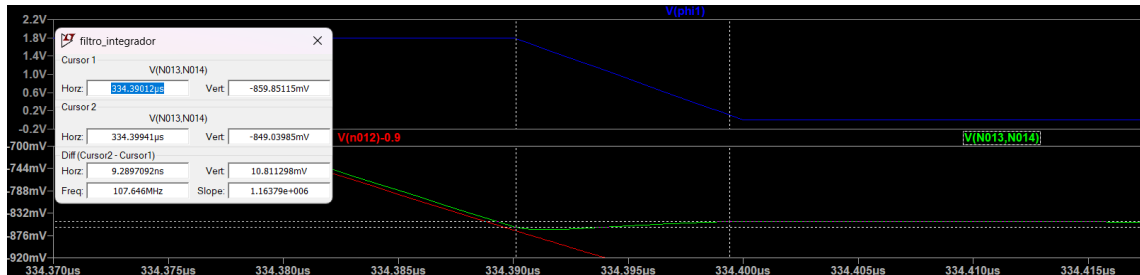


Figura 14: Error de carga medido para un condensador de muestreo de 0.1pF

Como podemos observar en la figura 14, el error resultante está alrededor de los 11 mV. Si repetimos el proceso, pero esta vez con un valor de condensador de muestreo de 1pF, error es:

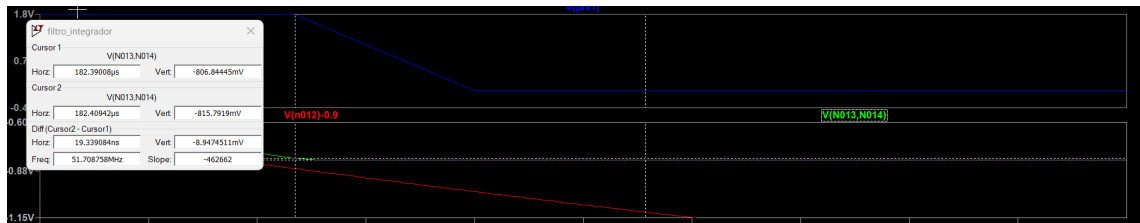


Figura 15: Error de carga medido para un condensador de muestreo de 1pF

En este caso vemos que el error se reduce (como debería ser) hasta un valor de aproximadamente 9 mV. Si realizamos una última prueba con un condensador de mayor capacidad, como por ejemplo 10pF, obtenemos el siguiente error de carga:

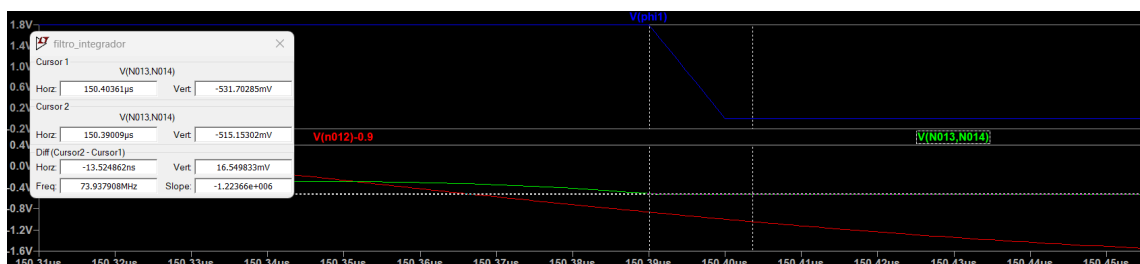


Figura 16: Error de carga obtenido para un condensador de muestreo de 10 pF

Como vemos, el erro de carga medido gráficamente aumenta a 16.5 mV. Ésto es debido a que en realidad no estamos midiendo exactamente el error de carga; debido a la gran capacidad del condensador, estamos viendo problemas en el seguimiento de la tensión de entrada ya que la frecuencia de muestreo es tan rápida que no permite que el condensador se cargue y descargue lo suficiente.

Por lo tanto, concluimos que con un valor de condensador de muestreo de 1pF obtenemos resultados de error de carga lo suficiente buenos para darlos por válidos. si fuese necesario reducir aún más el error, entonces sería necesario conocer las características internas del transistor para analizar el error de carga de forma analítica y encontrar la capacidad ideal del condensador de muestreo que nos diese el mínimo error de carga buscado, y posteriormente habría que simular su funcionamiento en el circuito.

7. Apartado 7

Para calcular valores de los condensadores tales que hagan al circuito diseñado comportarse como el circuito teórico del primer apartado, sus funciones de transferencia deben ser equivalentes. Para ello, se iguala término a término la función de transferencia teórica obtenida en el primer apartado con la función de transferencia calculada en el apartado 5 (13), una vez se ha normalizado el término cuadrático de ambas funciones. Además, debemos suponer que los valores de C_2 y C_5 son iguales, e iguales a 20pF, y C_1 y C_4 son a su vez iguales.

De esta forma, encontramos las siguientes equivalencias:

- $\frac{C_2}{C_2+C_7} = 0,963$
- $\frac{C_1 \cdot C_4}{C_5(C_2+C_7)} = 0,03466$
- $\frac{C_4 \cdot C_3 - C_5 \cdot C_7 - 2 \cdot C_5 \cdot C_2}{C_5(C_2+C_7)} = -1,928$

Despejando de las anteriores equivalencias, se obtienen los siguientes valores para los condensadores del circuito:

- $C_2 = C_5 = 20pF$
- $C_1 = C_4 = 3,79pF$
- $C_7 = 0,77pF$
- $C_3 = 3,82pF$

8. Apartado 8

En esta sección veremos con varias capturas como el funcionamiento de las salidas paso bajo y paso alto del filtro completo se comportan más o menos con lo que cabe esperar.

8.1. Salida paso bajo del filtro (Vlp)

En cuanto a la salida paso bajo, hemos adaptado el valor de los condensadores para que aproximadamente en los 30 kHz se encuentre un poco de funcionamiento que, según el diagrama de bode (2), la salida debería sufrir un pico de ganancia máxima antes de empezar a atenuarse pasada la frecuencia de corte.

Para comprobar lo antes mencionado, vamos a ver la salida paso bajo (vlp) para 3 frecuencias:

- **Frecuencia de 10 kHz:** veremos como la señal de salida debería ser muy similar a la señal de entrada.
- **Frecuencia de 30 kHz:** veremos como la señal de salida tiene mayor voltaje que la de entrada debido al pico de ganancia.
- **Frecuencia de 50 kHz:** veremos como la señal empieza a atenuarse y a desfasarse en mayor medida hasta llegar a la frecuencia de corte.

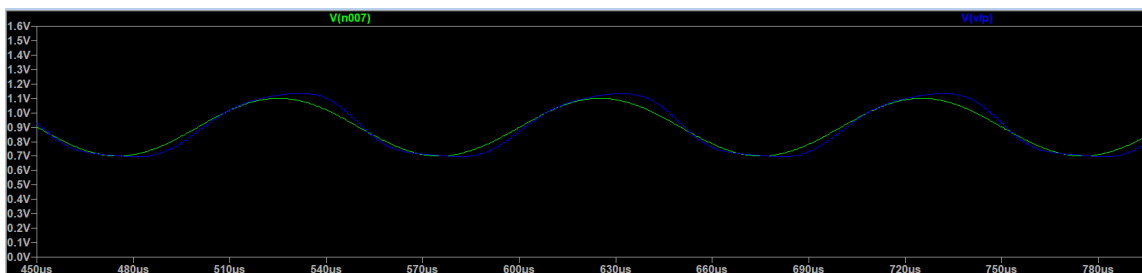


Figura 17: Salida paso bajo a 10 kHz

En la figura anterior podemos ver como la salida es muy similar a la entrada excepto por algún pequeño desfase que pueda existir.

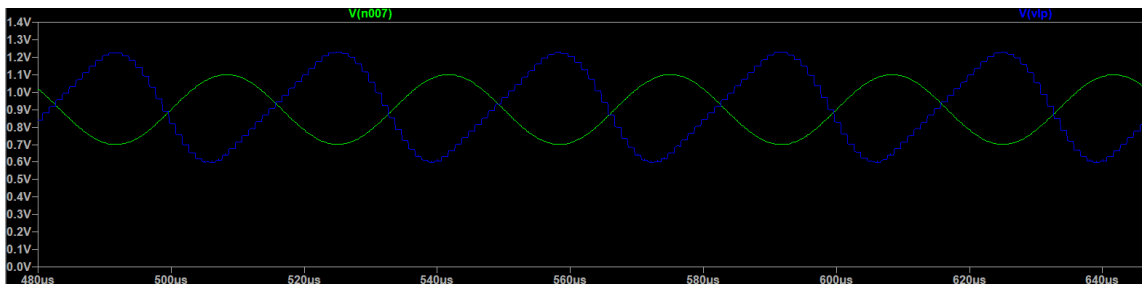


Figura 18: Salida paso bajo a 30 kHz

Podemos observar claramente como la salida tiene una ganancia en tensión respecto de la entrada.

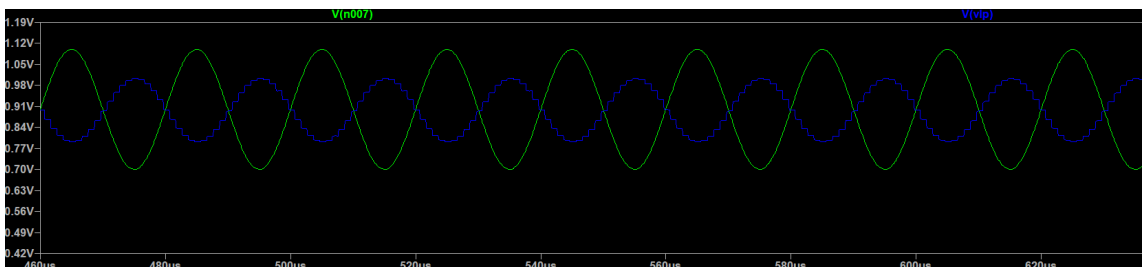


Figura 19: Salida paso bajo a 50 kHz

Finalmente podemos ver como la señal de salida está más atenuada que la de entrada, por lo que podemos suponer que conforme la frecuencia de entrada vaya aumentando, la señal de salida irá disminuyendo, es decir, la salida paso bajo se comporta efectivamente como un filtro paso bajo.

8.2. Salida paso banda del filtro (Vbp)

De la salida paso banda sabemos que al pertenecer a la primera etapa del filtro la cual fue analizada en el apartado 3, la frecuencia de corte del filtro paso bajo de primer orden correspondiente al análisis de solo esa etapa, será la frecuencia de corte menor del filtro paso banda, es decir, aproximadamente en los 8 kHz el filtro paso banda empezará a dejar pasar la señal. Si analizamos el diagrama de bode de un filtro paso banda de segundo orden, veremos que donde se encuentra la frecuencia central del filtro tendremos un pico de ganancia que afectará la salida, lo cual veremos claramente en una de las figuras a continuación.

A diferencia del caso anterior, la función de transferencia del filtro paso banda no lo conocemos por lo que calcular analíticamente y dar una aproximación de donde se encuentra el polo de funcionamiento del filtro no es posible. Por lo tanto, se analizará de forma gráfica y aproximada mediante prueba y error en el uso de diferentes frecuencias de entrada.

Para analizar el funcionamiento de la salida paso banda del filtro, probaremos con 4 frecuencias diferentes:

- **Frecuencia a 1 kHz:** A esta frecuencia el filtro no deja pasar la señal ya que es una frecuencia menor que la frecuencia de corte menor del filtro. Por lo que a la salida no deberíamos ver nada.
- **Frecuencia a 8 kHz:** A esta frecuencia se debería empezar a ver algo de señal a la salida, pero no gran cosa ya que nos encontramos al principio de la frecuencia de corte menor del filtro. Veremos una señal de salida muy atenuada.
- **Frecuencia a 20 kHz:** A esta frecuencia nos encontramos muy cerca del polo de funcionamiento, por lo que veremos una señal de salida muy por encima de la señal de entrada que incluso se satura (como podremos ver).
- **Frecuencia a 50 kHz:** A esta frecuencia ya nos encontramos en la pendiente de bajada cerca de la frecuencia de corte superior del filtro, por lo que veremos la señal de salida muy atenuada y desfasada respecto a la entrada.

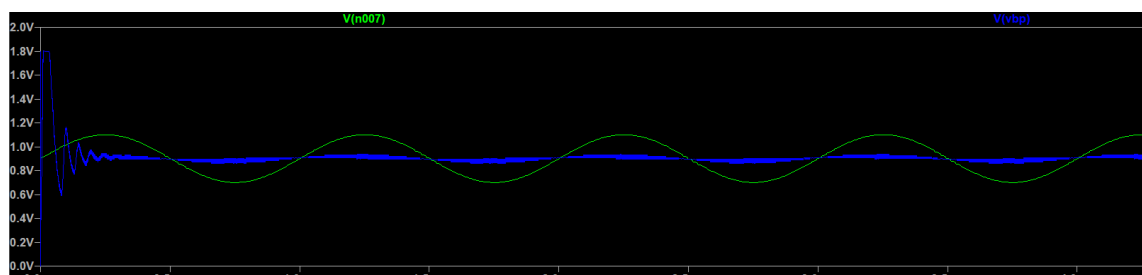


Figura 20: Salida paso banda a 1 kHz

Vemos como la salida es nula debido a que el filtro paso banda no deja pasar la señal hasta los 8 kHz.

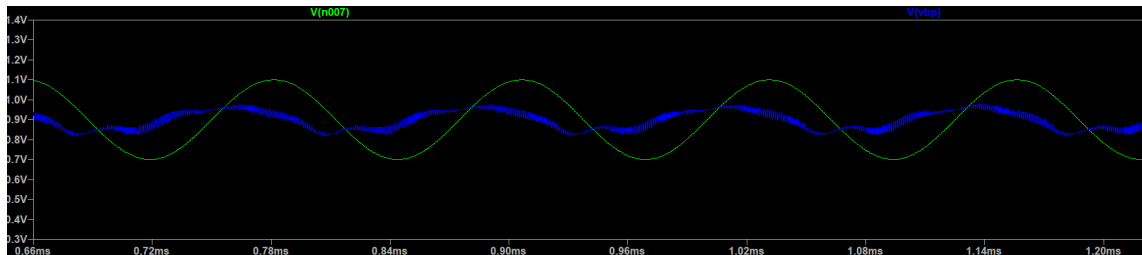


Figura 21: Salida paso banda a 8 kHz

Como se ha mencionada, la señal empieza a pasar ya que nos encontramos cerca de la frecuencia de corte menor del filtro.

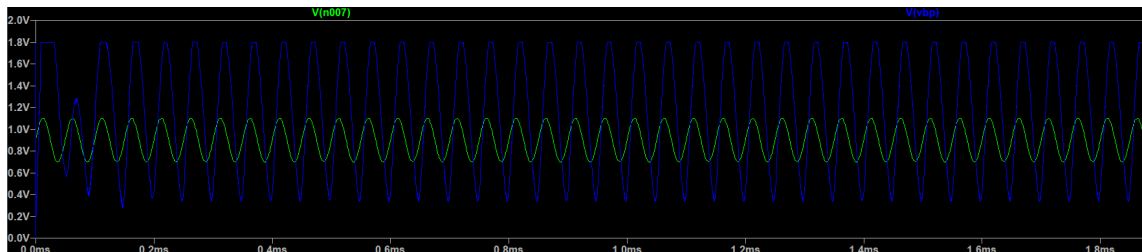


Figura 22: Salida paso banda a 20 kHz

Se puede observar como la señal de salida se satura por lo que tenemos los picos achatados.

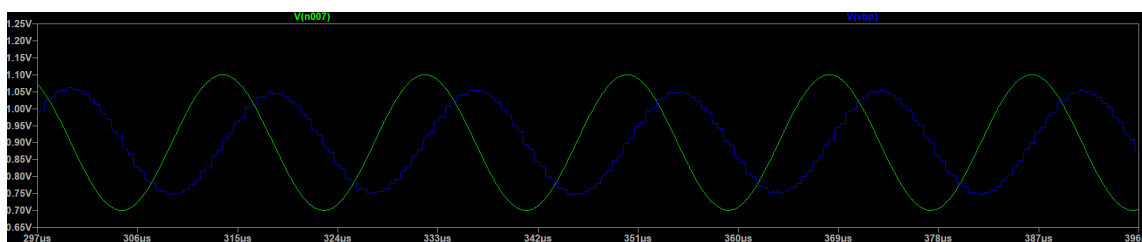


Figura 23: Salida paso banda a 50 kHz

Finalmente, vemos como la señal de salida se va atenuando respecto a la señal de entrada. Por lo tanto, podemos concluir que la salida paso banda se comporta efectivamente como un filtro baso banda.

9. Apartado 9

En este apartado se pide calcular todas las resistencias equivalentes de las redes de capacidad conmutada. Para realizar este cambio, se pueden sustituir los condensadores C_1 , C_7 , C_3 y C_4 , así como sus transistores correspondientes, por la resistencia equivalente en cada caso.

Para calcular el valor de la resistencia equivalente, hay que dividir el voltaje medio medido en cada condensador por la corriente media que atraviesa dicho elemento. No obstante, de manera analítica puede calcularse como $\frac{T_s}{C}$. Así, las resistencias equivalentes son las siguientes:

- $R_1 = R_4 = 263,85K\Omega$
- $R_7 = 1,3M\Omega$
- $R_3 = 261,78K\Omega$

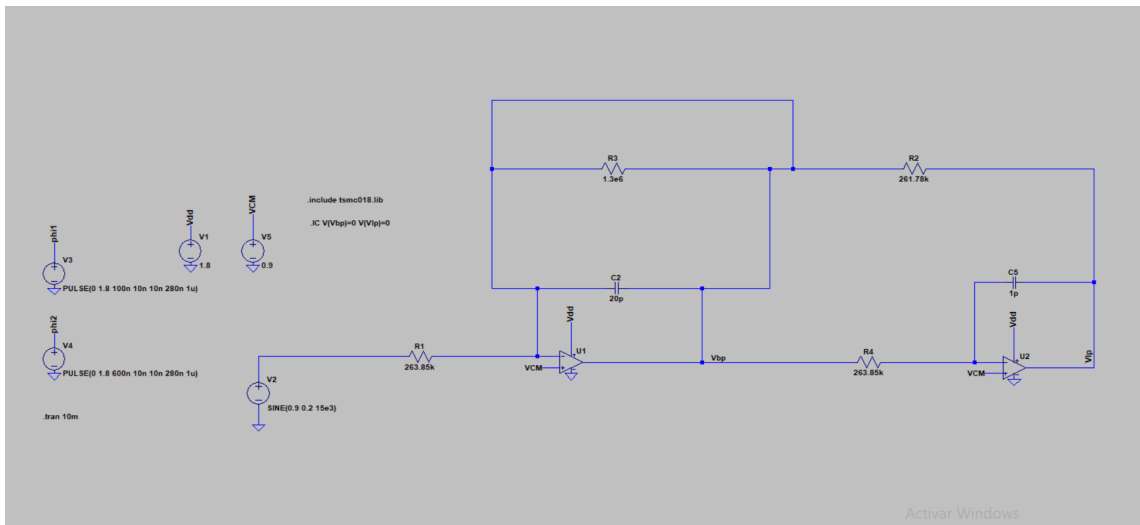


Figura 24: Circuito con resistencias equivalentes