



El riesgo de escribir aumenta a medida que se escribe\*

Herrada

# Capítulo 11

## Filtros Activos

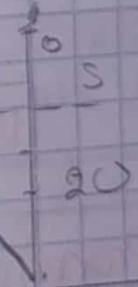
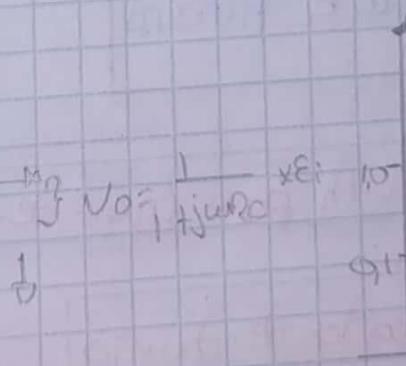
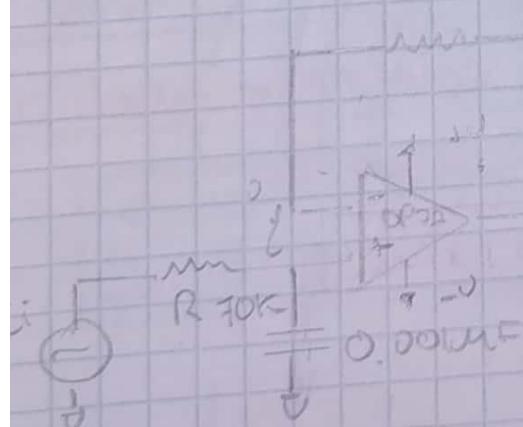
Los filtros son circuitos que permiten el paso de una determinada banda de frecuencias mientras rechazan todas las señales que no estén dentro de la banda.

### 11.1 Filtro pasa bajas básico

El filtrado se realiza en el circuito RC y el Op-Amp se utiliza como amplificador con ganancia unitaria

$$U_o = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} \times \beta_i$$

$$A_{CL} = \frac{U_o}{E_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$



### 1.2 Diseño del Filtro

La frecuencia de corte,  $\omega_c$ , se define como la frecuencia de la que el  $|A_{CL}|$  reduce a 0.707 veces su valor de baja frecuencia.

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c$$

DIA MES AÑO

NOTA

Atividades

"Mira si estima lo que con más tránsito se gana"

11.1.3

### Respuete del filtro

- Para calcular el valor de  $A_{cl}$

- La magnitud de  $A_{cl}$  para la frecuencia  $w_c$  con ángulo de fase es de  $-45^\circ$

$$A_{cl} = \frac{1}{1 + j}^1$$

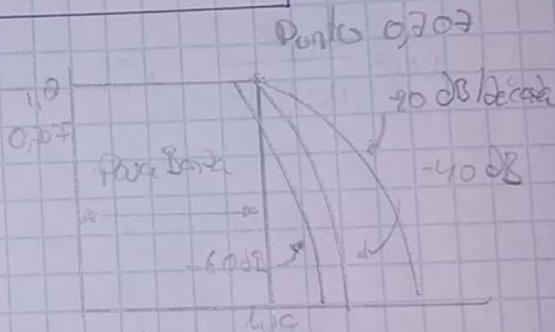
$$|A_{cl}| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

### 11.2 Introducción al Filtro Butterworth

También se le conoce como filtro maximamente plano o plano-plano no se disyen para mantener un ángulo de fase constante en la frecuencia de corte

El filtro pasa bajas de -20 dB/decada tiene un ángulo de fase de  $-45^\circ$  en  $w_c$

Un filtro de 40dB tiene en sólo de  $-90^\circ$  uno de  $-60$  dB/decada tiene  $-30^\circ$  en  $w_c$

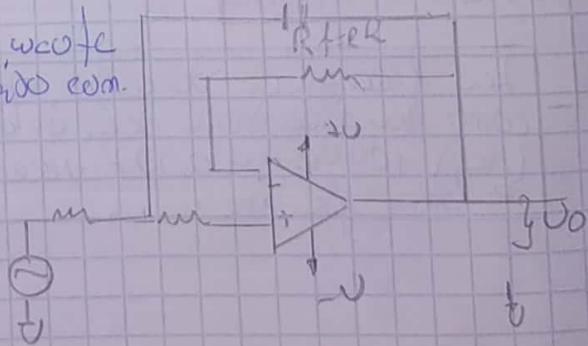


### 11.3 Filtro Butterworth para bajas de 40 dB/decada

#### 11.3.1 Procedimiento simplificado de diseño

- ① Define una frecuencia de corte  $w_{c0}$
- ② Define  $C_1$ ; elige un valor a decenas com. comprendido entre  $100\mu F$  y  $0,1\mu F$
- ③ Define  $C_2 = 2C_1$
- ④ Calcula:
- ⑤ Define  $R_f = 2R$

$$R = \frac{0,707}{w_{c0} C_1}$$



### II.3.2 Respuesta del filtro

La curva punteada conserva el valor de 0dB cuando la frecuencia es igual al valor de  $\omega_c$  rad/s

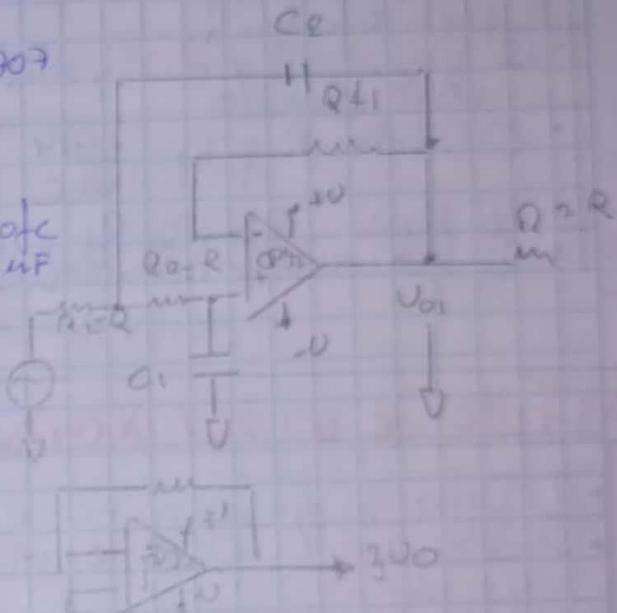
hexagonal de fase tienen un valor que van de 0 a 360 grados cuando la frecuencia es  $\omega_c$

### II.4 Filtro Butterworth Pasa Bajas < 10 dB/Decade

#### II.4.1 Procedimiento de diseño simplificado

La magnitud de  $A_{cl}$  debe ser de 0.707 para  $\omega_c$

- ① Define la frecuencia de corte  $\omega_{cfc}$
- ② Define  $C_3$  valor entre 0.001 y 0.1  $\mu F$
- ③ Define  $C_1 = 1/2 C_3$  y  $C_2 = 2 C_3$
- ④ Calcula  $R = 1/\omega_c C_3$
- ⑤ Define  $R_1 = R_2 = R$
- ⑥  $R_{f1} = 2R$  y  $R_f2 = R$



#### II.4.2 Respuesta del Filtro

La curva punteada que aparece en las proximidades del indicador approxima con una linea recta

$A_{cl}$  se mantiene muy próximo a 10dB hasta llegar abajo de la curva de corte  $\omega_c$

### II.5 Filtros Butterworth para altas

Los filtros para altas son circuitos que atenuan todas las señales una frecuencia esté por debajo de una frecuencia de corte  $\omega_c$

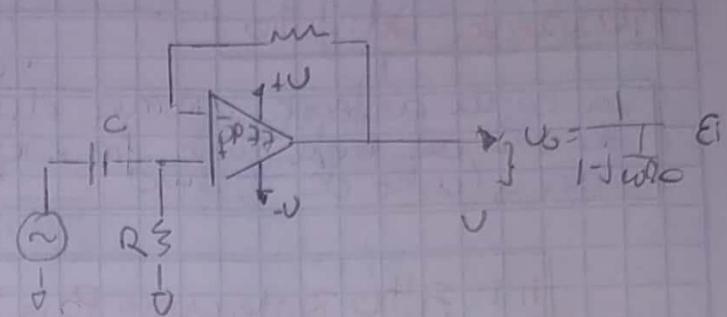
#### II.5.1 Filtro de 20 dB/decade

Se incluye la resistencia de retroalimentación  $R_f$  a fin de reducir el desvío de cd

Todos los cálculos lo que con más detalle se detallan en la clase.

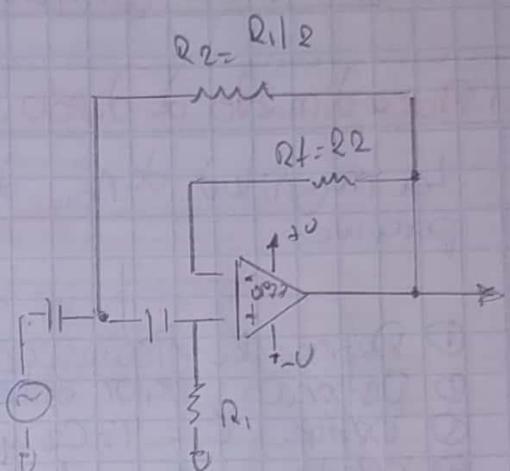
El voltaje de salida  $V_o$  es igual al voltaje que pone por  $R_3$

La magnitud de salida de la señal pasa banda en lazo cerrado es igual a 0,707 cuando  $\omega R C = 1$



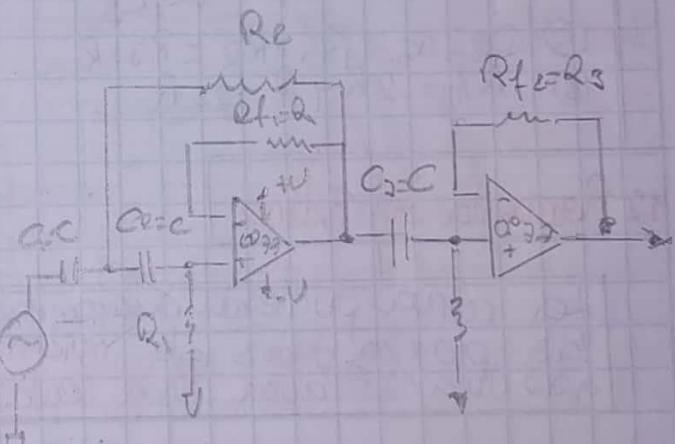
### 11.5.3 Filtro de 40 dB/Decada

- ① Define una frecuencia de corte  $\omega_c = \omega_{fc}$
- ② Define  $C_1 = C_2 = C$  y elige un valor correcto
- ③ Calcula  $R_1 = R_2 = 1.414 \frac{W_C}{\omega C}$
- ④ Haga  $R_f = 112 R_1$
- ⑤ Para reducir al mínimo el denro  $R_f R_1$



### 11.5.4 Filtro de 60 dB/Decada

- ① Define la frecuencia de corte  $\omega_c = \omega_{fc}$
- ② Seleccione  $C_1 = C_2 = C > C$  entre los valores 10 o 14 UF
- ③ Calcula  $R_1 = 1 \frac{W_C}{\omega C}$
- ④ Define  $R_2 = 2 R_1$
- ⑤ Seleccione  $R_f = 112 R_1$
- ⑥ Define  $R_f = R_1$  y  $R_f2 = R_2$



### 11.5.5 Comparación de magnitudes y ángulos de fase

Por cada aumento de 20 dB/Decada, el circuito no sólo tiene una atenuación más pronunciada, sino que también se mantiene cercano a 0dB

### 11.6 Introducción a los filtros pasa banda

### 11-6.1

## Resposta a la frecuencia

Los filtros para banda son selectivos de frecuencia

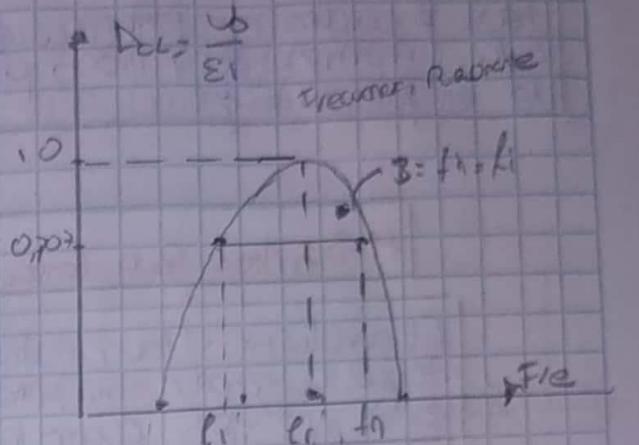
Tiene una ganancia máxima en la frecuencia resonante y tienen una ganancia de 0,707 dB

La frecuencia de corte superior, la ganancia es 0,707.

### 11-6.2

## Ancho de Banda

El ancho de banda no se encuentra centrado justamente en la frecuencia resonante



$$\left\{ \begin{array}{l} B = f_h - f_l \\ f_r = \sqrt{f_l f_h} \quad f_i = \sqrt{\frac{B^2}{4} + f_r^2} \\ f_h = f_i + B \end{array} \right.$$

### 11-6.3

## Factor de Calidad

$$Q = \frac{f_r}{B}$$

### 11-6.4

## Filtros de Banda Ancha y de Banda estrecha

Los filtros de banda ancha tienen un ancho de banda que es 2 veces o más veces la frecuencia resonante

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Banda Ancha} \quad Q \leq 0.5 \\ \text{Banda Estrecha} \quad Q > 0.5 \end{array} \right.$$

### 11-7 Filtro de Banda Ancha Básico

#### 11-7.1

## Configuración en Paralelo

Cuando se conecta en serie la salida de un circuito con la entrada de un segundo circuito, las etapas de ganancia están en paralelo.

#### 11-7.2

## Círculo del filtro de banda ancha

- ①  $f_i$  determinada por el filtro para altas
- ②  $f_h$  definida por el filtro para bajas
- ③ Ganancia máxima en la  $f_r$

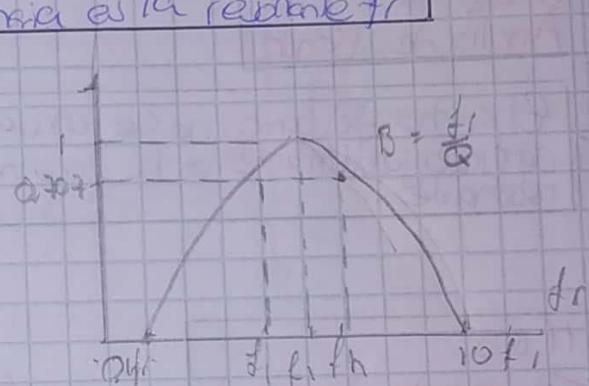
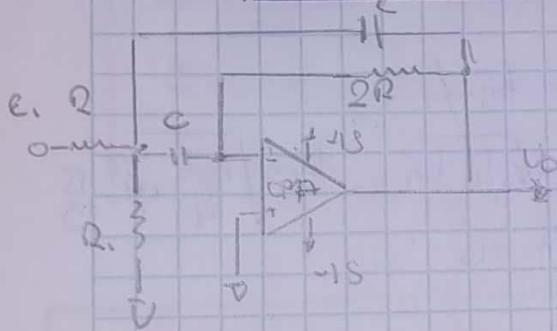
11.7.3

### Respuesta a la frecuencia

Las curvas con forma de envelope a la frecuencia del filtro o banda de respuesta en función de  $f$

### 11.8 Filtros para Banda de Banda Ancha

El análisis y la construcción se simplifica si se parte de que la ganancia máxima del filtro de banda ancha es de 100 dB cuando la frecuencia es la resonante  $f_r$



### 11.8.1 Circuito del filtro de Banda Ancha

Se utiliza sólo un OP-AMP. La resistencia que define la  $R$  de trabajo del filtro es la que define la  $R$  de trabajo del filtro. La ganancia máxima del filtro será 100 dB

### 11.8.2 Funcionamiento

El ancho de banda se determina por la resistencia y los condensadores

$$B = \frac{0.191}{Q}$$

$$B = \frac{f_r}{Q}$$

$$Rr = \frac{Q}{2Q^2 - 1}, f_r = \frac{0.11Q}{Q} \sqrt{\frac{1+Q^2}{2}}$$

### 11.8.3 Filtro de octavas para equalizador de estéreo

El equalizador de un estéreo tiene 10 filtros para banda por canal

Esto se elimina o refuerza para pulsar efectos de sonido especiales

"El deseo de escribir aumenta a medida que se escribe"

Martes

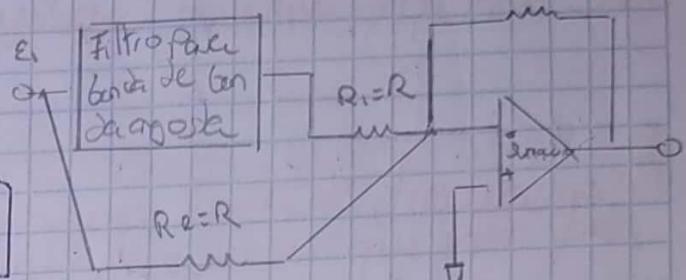
## 11.9 Filtros de Muesca

Su nombre se debe a la forma característica de su curva de respuesta a la frecuencia, las frecuencias indeseables se atenúan en la banda de rechazo.

## 11.9.2 Teoría de los filtros de muesca

- Se construye restando la salida de un filtro pasa banda a la señal original

La entrada  $E_i$  se divide entre la mitad de la resistencia de entrada sumadora



## 11.10 Filtro de Muesca de 120MHz

Cuando se amplifica señales de bajónivel, existe la posibilidad de que haya una o varias señales de ruido indeseables que se suprime por la muesca.

### 11.10.2 Planteamiento del problema

Se elige una banda de rechazo  $B = 12\text{Hz}$  para la ganancia del filtro en la banda de paso  $S_1$  y  $S_2$  ( $100\text{Hz}$ ). Tienen bandas angostas y curvas de respuesta a la frecuencia muy pronunciadas.

### 11.10.3 Procedimiento para construir un filtro

- ① Construir perylante que tiene una misma frecuencia resonante
- ② Conecte el sumador inverter eligiendo resistencias iguales para  $R$

### 11.10.4 Componentes del filtro pasa banda

Se construye la componente del filtro pasa banda, se calibra con precisión ajustando  $R_1$ .

### 11.10.5 Montaje Final

Solo hay que conectar un sumador inverter con resistencias de entrada y de retroalimentación de  $1\%$  de  $10\text{k}$ .

## Bibliografía

R. Coughlin y F. Dricoll Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales  
Méjico, Prentice Hall Hispanoamérica SA 1997.

## Problemas

1 Haga una lista de los cuatro tipos de filtro que se han mencionado en este capítulo

Filtro pasa bajas  
Filtro pasa altas

Filtro pasa banda  
Filtro inversor/rechaza banda

2 ¿Cuál es el filtro que tiene voltaje de salida constante dentro de hasta la frecuencia de corte?

Filtro pasa bajas

3 ¿Cómo se llama el filtro que pasa una banda de frecuencia al mismo tiempo que atenúa todas las frecuencias que están fuera de la banda?

Filtro pasa banda

4 En la figura II-2(a), si  $R = 100 \text{ k}\Omega$  y  $C = 0,009 \mu\text{F}$ , ¿cuál es la frecuencia de corte?

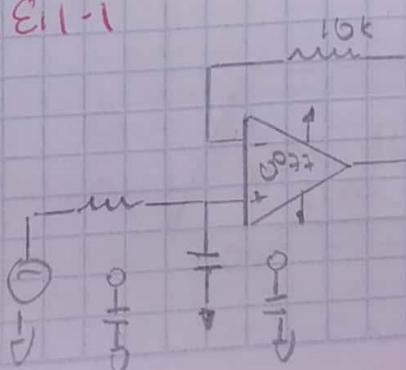
$$f_{c} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(100)(0,009)} = 79,58 \text{ Hz}$$

5 El filtro pasa bajas de la figura II-2(a) se diseñara para una frecuencia de corte de  $4,5 \text{ kHz}$ . Si  $C = 0,005 \mu\text{F}$ , calcule el valor de  $R$

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{1}{2\pi(4,5 \times 10^3)(0,005)} = 7023,55 \Omega = 7 \text{ k}\Omega$$

6 Calcule la frecuencia de corte dada el valor de  $C$  de la figura

II-1-1



Todos los cálculos lo que crea cada trabajo en orden

$$f_c = \frac{1}{2\pi(0,001\text{UF})(10\text{k})} = 15,915 \text{ kHz}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi(0,01\mu\text{F})(10\text{k})} = 1,59 \text{ kHz}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi(0,1\text{mF})(10\text{k})} = 159,15 \text{ Hz}$$

4. ¿Cuáles son las características de un filtro Butterworth?

Responde plana en la banda de paso  
caido de 20 dB/decada en la banda atenuada  
filtro caracterizado por las veloces de variación

8. ¿Diseñe un filtro pasa bajas de -4 dB/decada para una frecuencia de corte de 10 rad/s. Defina  $A = 0,02\text{mF}$

$$\omega = 10 \text{ rad/s}$$

$$C = 0,02\text{mF}$$

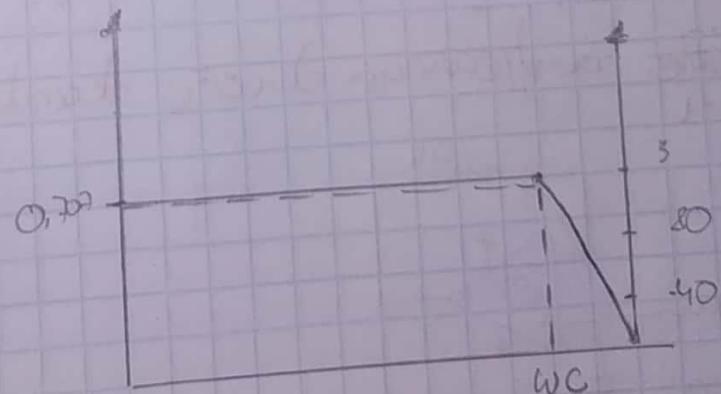
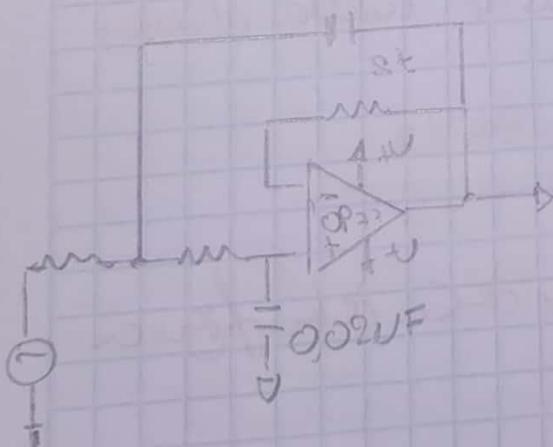
$$G = 400\text{V/decada}$$

$$f_c = \frac{10 \text{ rad/s}}{2\pi} = 1,591 \text{ kHz}$$

$$W_c = 1/R_C = 10 \text{ rad/s} = \frac{1}{R(0,02\text{mF})}$$

$$C = 0,02\text{mF}$$

REST



"El deseo de escribir aumenta a medida que se recuerda"

9 En la figura 11-4 calcule  $R_1 = R_2 = 10\text{K}$ ,  $C_1 = 0,01\text{mF}$  y  $C_2 = 0,009\text{uF}$  calcule la frecuencia de corte,  $f_c$

$$\omega_0 = 10 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

$$C_1 = 0,009\text{uF}$$

$$W_C = 1,591,599\text{Hz}$$

$$R = \frac{1}{\omega_0 C_1} = \frac{1}{(1,591,599)(0,009 \cdot 10^{-6})} = 128,631,07$$

$$R = R_1 = R_2$$

$$R_f = 2 \cdot R = 2 \cdot 128,631,07 = 257,362\Omega$$

10 Calcule: a)  $R_3$ ; b)  $R_1$ , y d)  $R_2$  en la figura 11-5(a) para una frecuencia de corte de  $10 \text{ rad/s}$ . Difira  $C_3 = 0,009\text{uF}$

$$R_1 = R_2 = R_3 = 20\text{k}\Omega$$

$$C_1 = 0,002\text{mF}$$

$$C_2 = 0,008\text{uF}$$

$$C_3 = 0,009\text{uF}$$

$$W_C = R$$

$$f_c \cdot R \cdot C_3 = 1$$

$$f_{c3} = \frac{1}{(20\text{k})(0,009 \cdot 10^{-6})} = 5,2 \cdot 10^5 \text{ rad/s}$$

$$f_{c2} = 0,5 \cdot 10^2 \text{ rad/s}$$

$$W_{c2} = 2\pi f_{c2} = (2\pi)(5,2 \cdot 10^5) = 32,5 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

11 Si  $R_1 = R_2 = R_3 = 20\text{k}\Omega$ ,  $C_1 = 0,002\text{mF}$ ,  $C_2 = 0,008\text{uF}$  y  $C_3 = 0,009\text{uF}$  de la figura 11-5(a), calcule la frecuencia de corte  $\omega_c$ .

$$C_1 = 0,01\text{mF}$$

$$C_2 = 0,04\text{uF}$$

$$C_3 = 0,009\text{uF}$$

$$W_C = 1\text{rad/s}$$

$$R = 20\text{k}\Omega$$

$$R = \frac{1}{\omega_0 C_3} = \frac{1}{1\text{rad/s} \cdot 0,009 \cdot 10^{-6}} = 111,111\text{M}\Omega$$

$$R = 20\text{k}\Omega$$

12 En la figura 11-5(a),  $C_1 = 0,01\text{mF}$ ,  $C_2 = 0,04\text{uF}$  y  $C_3 = 0,009\text{uF}$ . Calcule  $R$  para una frecuencia de corte de  $1\text{kHz}$

DIA

MES

AÑO

NOTA

"Más se estima lo que con más trabajo se gana"

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1k \cdot 0.02 \mu F}$$

$$R = 50 k\Omega$$

13) Calcule R en la figura 11-7(a) si  $C = 0.04 \mu F$  y  $f_c < 500 Hz$

$$C = 0.04 \mu F$$

$$f_c = 500 Hz$$

$$R = ?$$

$$\omega C = 1k \text{ rad/s}$$

$$\omega C = 1/RC$$

$$R \cdot C \cdot \omega C = 1$$

$$R = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1k \cdot 0.04 \mu F}$$

$$R = 3.987 \cdot 10^8$$

$$R = 398.7 M\Omega$$

14. En la figura 11-7(a) calcule a)  $\omega_c$  y b)  $f_c$  si  $R = 10 k\Omega$  y  $C = 0.01 \mu F$

$$R = 10k$$

$$C = 0.01 \mu F$$

$$\omega C = ?$$

$$f_c = ?$$

$$a) \omega_c = \frac{1}{RC} = \frac{1}{10k \cdot 0.01 \mu F}$$

$$\omega_c = 10k \text{ rad/s}$$

$$b) f_c = \frac{1}{2\pi R C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10k \cdot 0.01 \mu F}$$

$$f_c = 1.59 k Hz$$

15) Diseñe un filtro pasa alto de 40 dB/decade para  $\omega_c = 5k \text{ rad/s}$   $C_1 = C_2 = 0.02 \mu F$

$$① \omega_c = 5k \text{ rad/s}$$

$$② C_1 = C_2 = 0.02 \mu F$$

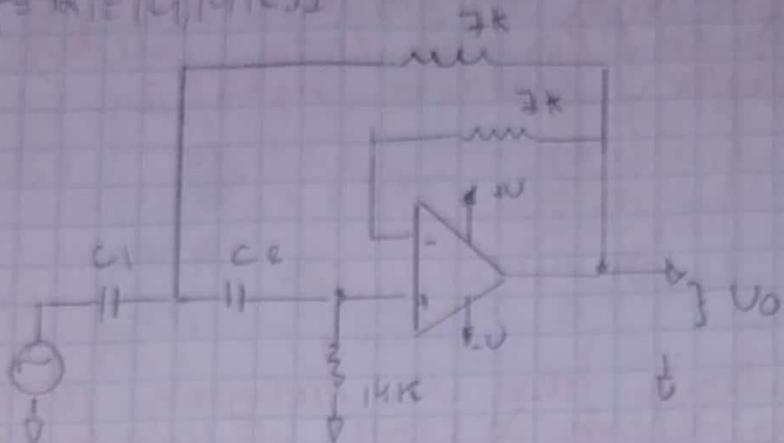
$$③ R_1 = \frac{1.414}{\omega_c} = \frac{1.414}{(5 \text{ rad/s}) (0.02 \mu F)} = 14.14 k\Omega$$

$$= 14.14 k\Omega$$

$$④ R_2 = 1/\theta R_1$$

$$R_2 = 7.07 k\Omega$$

$$R_1 = R_2 = 14,14 \text{ k}\Omega$$



16 Calcule a)  $R_1$  y b)  $R_2$  de la figura 11-8(a) para una frecuencia de corte de  $U_o$  igual a  $250 \text{ rad/s}$  ( $C_1 = C_2 = 250 \text{ pF}$ )

$$R_1 = \frac{1,414}{(40 \text{ krad/s})(250 \text{ pF})}$$

$$R_1 = 14,14 \text{ k}\Omega$$

$$R = R_1/2 = 7,07 \text{ k}\Omega$$

17 En el caso de la figura 11-9(a) defina  $C_1 = C_2 = C_3 = 0,03 \mu\text{F}$   
Calcule a)  $R_3$  b)  $R_1$  y c)  $\omega_c$  para una frecuencia de corte de  $500 \text{ Hz}$

$$R_3 = \frac{1}{2\pi(500 \text{ Hz})(0,03 \mu\text{F})} = 6366,12 \Omega$$

$$R_1 = 2(6366,12 \Omega) = 12732,29 \Omega$$

$$R_2 = 112(6366,12 \Omega) = 71831 \Omega$$

18 El Circuito de la figura 11-9(a) este diseñado con valores  $C_1 = C_2 = C_3 = 100 \text{ pF}$ ,  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 25 \text{ k}\Omega$  y  $R_3 = 50 \text{ k}\Omega$ . Calcule la frecuencia de corte  $f_c$

$$R_3 + \frac{1}{\omega_c C}$$

$$\omega_c = \frac{1}{(50 \text{ k}\Omega)(400 \text{ pF})} = 50 \text{ rad/s}$$

19 Calcule a) ancho de banda b) frecuencia resonante y c) el factor de calidad de un filtro pasa banda que tenga frecuencias de corte inferior y superior de 550 y 650 Hz

$$B = f_h - f_l$$

$$B = 650 - 550$$

$$B = 100 \text{ Hz}$$

$$f_r = \sqrt{f_l f_h}$$

$$f_r = \sqrt{550 \cdot 650}$$

$$f_r = 5979 \text{ Hz}$$

$$\alpha = \frac{f_r}{B} \quad Q = 3.97$$

$$Q = \frac{59.79}{10}$$

20 Un filtro pasa banda tiene una frecuencia resonante de 1000 Hz y un ancho de banda de 2500 Hz. Calcule las frecuencias de corte inferior y superior

$$f_l = \sqrt{\frac{B^2}{4} + f_r^2} - \frac{B}{2}$$

$$= \sqrt{\frac{(2500)^2}{4} + (1000)^2} - \frac{2500}{2}$$

$$f_H = f_l + B$$

$$f_H = 350.78 + 2500$$

$$f_H = 2850.78 \text{ Hz}$$

21 Use los valores del capacitor y de las resistencias del filtro para altas de la figura II-11 para demostrar que  $f_c = 3000 \text{ Hz}$

$$f_c = 3000 \text{ Hz}$$

$$C = 0.05 \mu\text{F}$$

$$R_1 = 7.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 18 \text{ k}\Omega$$

$$f_c = \frac{1.414}{R C}$$

$$f_c = \frac{1.414}{(7.8 \text{ k}\Omega)(0.05 \mu\text{F})} = 3330$$

22 Utilice los valores del capacitor y de las resistencias del filtro para altas de la figura II-11 para demostrar que  $f_c = 3000 \text{ Hz}$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C} = \frac{1}{2\pi(188.18)(0.05 \mu\text{F})}$$

$$f_c = 3000 \text{ Hz}$$

"El deseo de escribir aumenta a medida que se escribe"

23 Calcular el valor de Q para el filtro pasa banda de la figura 11-11

$$AB = FH - FL = 3000 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz} = 2700 \text{ Hz}$$

$$fr = \sqrt{f_H f_L} = \sqrt{3000 \times 300} = 946,68 \text{ Hz}$$

$$Q = \frac{fr}{AB} = \frac{946,68 \text{ Hz}}{2700 \text{ Hz}} = 0,35$$

24 Diseñar un filtro pasa banda angosto utilizando un OP-AMP.

$$B = \frac{fr}{Q} = \frac{128 \text{ Hz}}{1,8} = 85,33 \text{ Hz}$$

$$R_C = \frac{0,1591}{B_C} = \frac{0,1591}{85,33 \text{ Hz} (0,14\pi)} = 18,64 \text{ k}\Omega$$

$$R = 18,64 \text{ k}\Omega \quad R_1 = \frac{R}{2Q^2} = \frac{18,64 \text{ k}\Omega}{2(1,8)^2} = 5,12 \text{ k}\Omega$$

25 a) ¿Cómo convertiría el filtro pasa banda del problema 11-24 en un filtro de muesca que tenga la misma frecuencia resonante y el mismo factor b) ¿Calcule los valores de  $f_1$  y  $f_H$  del filtro muesca?

a) Conectando el filtro pasa banda con un sumador inversor

$$AB = \frac{fr}{Q} = \frac{128 \text{ Hz}}{1,8} = 85,33 \text{ Hz}$$

$$f_1 = \sqrt{\frac{3Q}{4} + f_H^2} - \frac{f_H}{2} = \sqrt{\frac{(85,33)^2}{4} + 128^2} - \frac{85,33}{2}$$

$$f_1 = 92,28 \text{ Hz} + 92 \text{ Hz}$$

$$f_H = f_1 + B = 92 \text{ Hz} + 85,33 = 177,33 \times 177 \text{ Hz}$$

## Simulaciones

① Construya un filtro pasa bajas. Y mida todas las valores de los componentes antes de armar el circuito con los valores medidas calcule las frecuencias de corte. Visualice el diagrama de Bode.

## Análisis

Este circuito evita el paso o filtra una frecuencia intermedia en este caso una frecuencia de  $10\text{ kHz}$  esto gracias al sistema RC es decir un capacitor y una resistencia en serie este circuito se comporta como un circuito abierto, de tal manera que para altas frecuencias el capacitor reduce su reactancia por lo que la señal se atenúa y el voltaje desarrollado crece.

DIÁ MES AÑO

NOTA

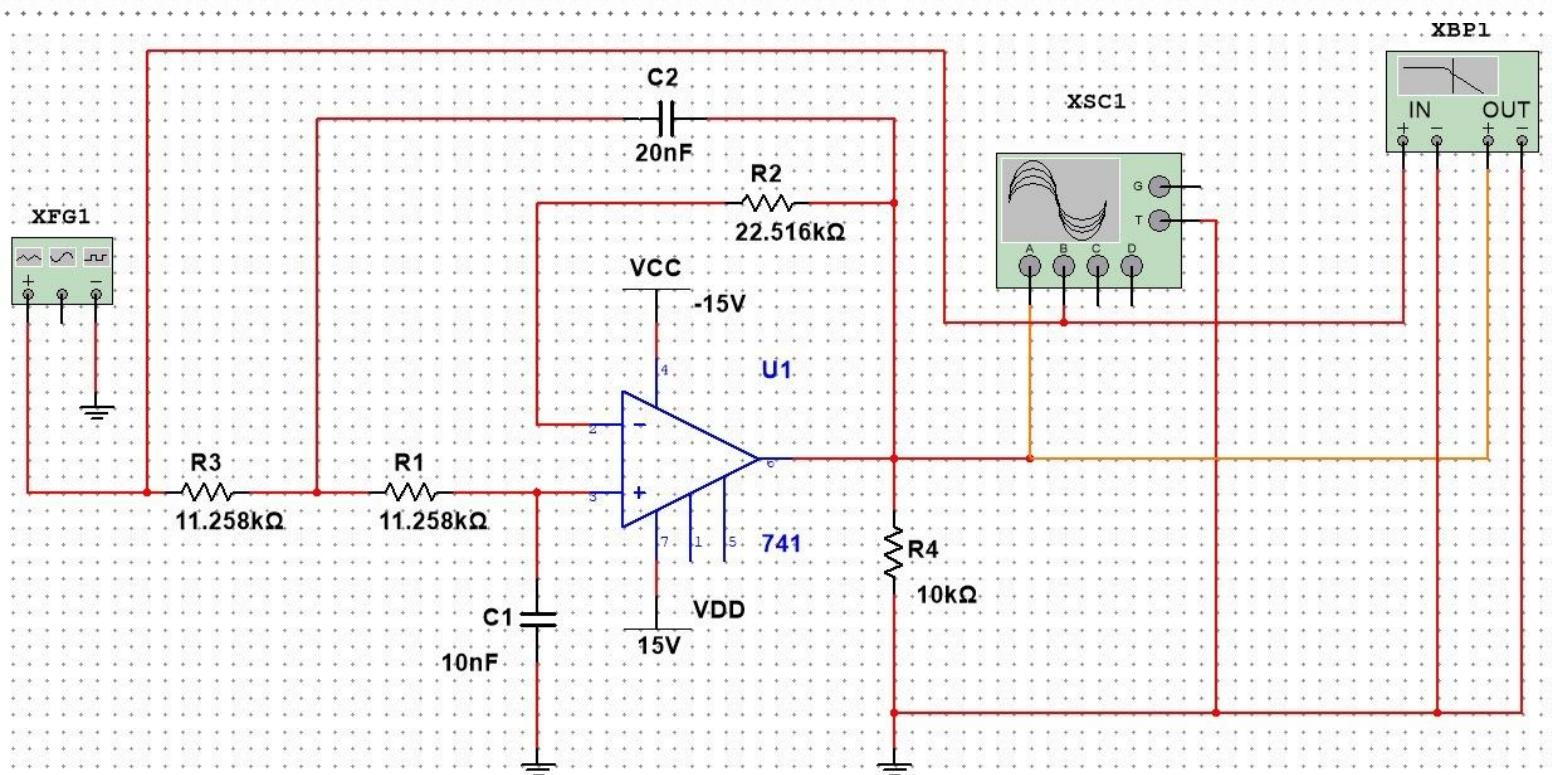
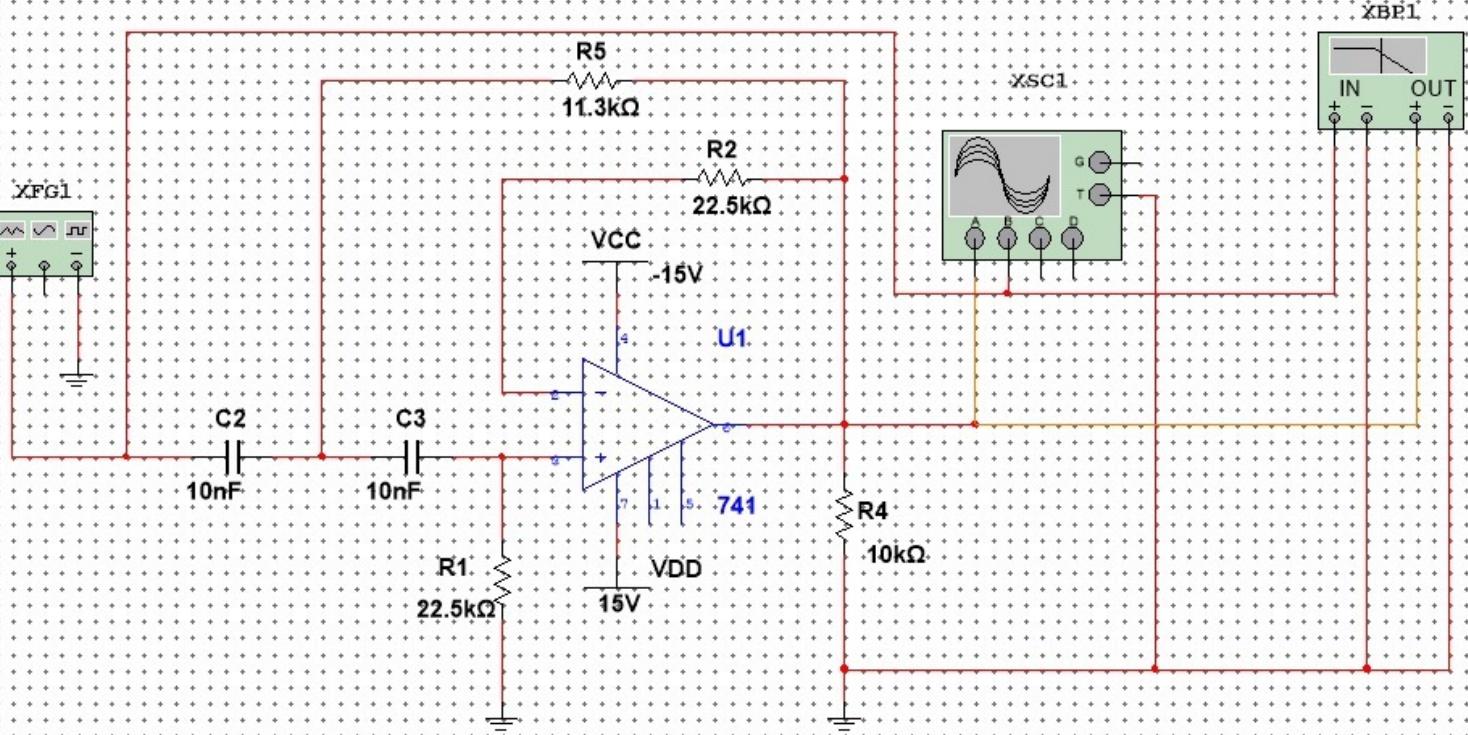
"El deseo de escribir aumenta a medida que se escribe"

Hoyendo

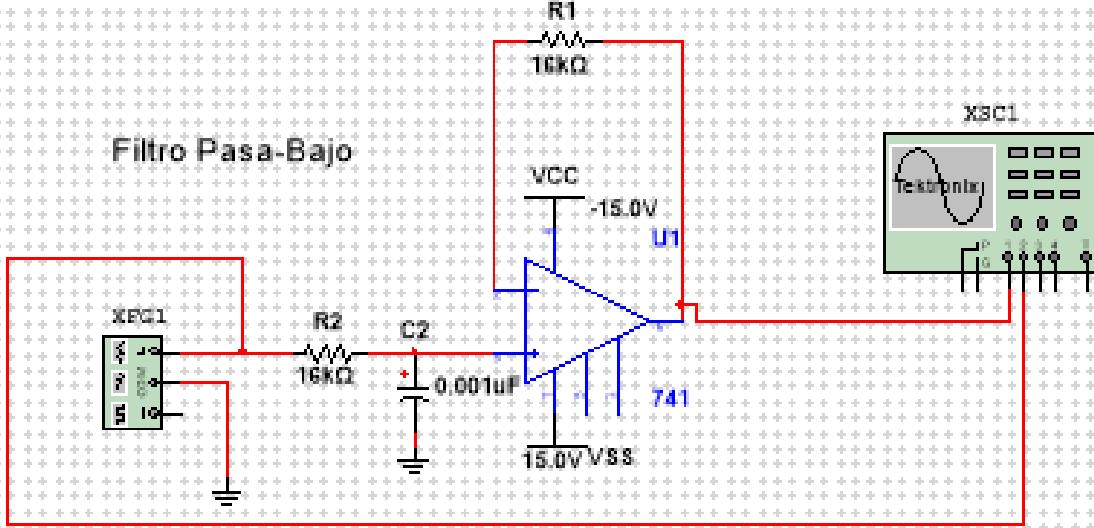
② Construye un filtro pasa banda, el cual este formado por un filtro pasa bajas y un filtro pasa altas de primer orden. Dibuja el Diagrama de Bode.

## Análisis

Este circuito entre el paso de frecuencias entre 500 y 5K, está construido a base de un circuito RLC, además usa un filtro pasa bajas en serie con un filtro pasa alto en donde la frecuencia de corte que pasa bajo debe ser mayor que el paso alto, afín de que la respuesta global sea pasa banda.



### Filtro Pasa-Bajo



### Filtro Pasa-Alto

