

**ELECTRÓNICA BÁSICA**  
**SEGUNDO PARCIAL. CURSO 04/05**

→ RESUELTO ←

NOMBRE Y APELLIDOS \_\_\_\_\_ GRUPO \_\_\_\_\_

EJ.1	EJ.2	EJ.3	EJ.4	

**EJERCICIO 1**

Suponga el circuito mostrado en la figura 1 y suponga que el transistor queda descrito en primera aproximación por los siguientes parámetros:  $V_{BE,on} = 0.7V$ ,  $V_{BC,on} = 0.6V$ ,  $\beta_F = 100$  y  $\beta_R = 1$ .

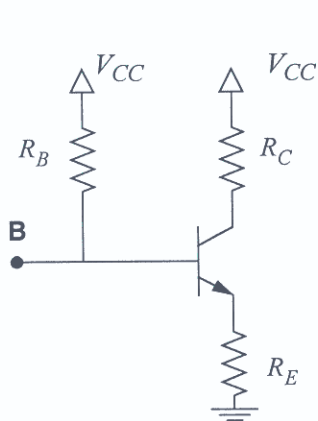


Figura 1

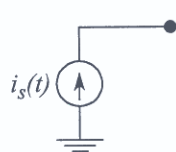


Figura 2

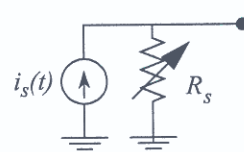


Figura 4

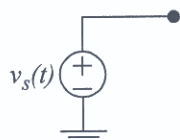


Figura 3

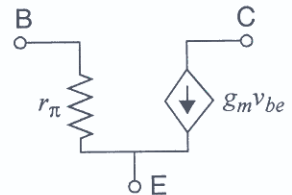
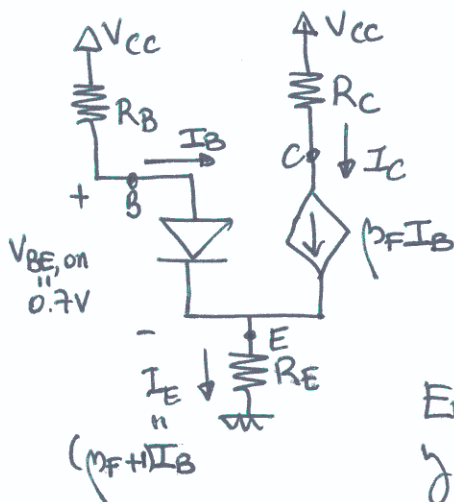


Figura 5

(a) Suponga  $R_B \gg \beta_F R_C, \beta_F R_E$  y discuta razonadamente en qué región de operación queda polarizado el transistor en estas condiciones. Calcule las tensiones e intensidades en dicho punto para  $R_B = 1M\Omega$ ,  $R_C = R_E = 1k\Omega$  y  $V_{CC} = 10V$ .

Si asumimos ZAD:



ETAPA DE ENTRADA:

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE,on} + (\beta_F + 1) R_E I_B$$

$$\rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE,on}}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \quad (1)$$

ETAPA DE SALIDA:

$$V_{CC} = \beta_F R_C I_B + V_{CE} + (\beta_F + 1) R_E I_B$$

$$\rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_B [\beta_F R_C + (\beta_F + 1) R_E] \quad (2)$$

En ZAD se debe cumplir  $V_{BE} > 0$  (asumido) y  $V_{BC} < 0$  (por demostrar)

$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$ , luego, substituyendo (1) y (2)

$$V_{BC} = V_{BE,on} - V_{CC} + \frac{V_{CC} - V_{BE,on}}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \cdot [\beta_F R_C + (\beta_F + 1) R_E]$$

$$= (V_{BE,on} - V_{CC}) \left( 1 - \frac{\beta_F R_C + (\beta_F + 1) R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \right) \Rightarrow V_{BC} \approx V_{BE,on} - V_{CC} < 0$$

$\ll 1$ , ya que  $R_B \gg \beta_F R_C, \beta_F R_E$

c.q.d.

$$I_{BQ} \stackrel{(1)}{\approx} \frac{10 - 0.7}{1000k + 101k} = 8.45 \mu A \Rightarrow I_{CQ} = \beta_F I_{BQ} = 844.69 \mu A$$

$$I_{EQ} = (\beta_F + 1) I_{BQ} = 853.13 \mu A$$

$$V_{BEQ} = 0.7V ; V_{CEQ} = 10 - 8.45 \mu \cdot (100k + 101k) = 8.3V \Rightarrow V_{BCQ} = 0.7 - 8.3V = -7.6V$$

(b) Las figuras 2, 3 y 4 muestran tres redes que se pretenden usar como alternativas para introducir una excitación de pequeña señal conectándolos al terminal de base B.

Discuta si puede haber funcionamiento correcto con las excitaciones de las figuras 2 y 3, respectivamente.  $\rightarrow$  (Se entiende, como amplificador de  $i_s(t)$  ó  $v_s(t)$ )

Para el caso de la figura 4 realice también esta discusión cualitativa en función de que  $R_s$  sea muy grande o muy pequeña.

Se debe introducir la pequeña señal de forma que no se modifique apreciablemente el punto de operación determinado por las redes de polarización de la figura 1.

• De acuerdo con lo anterior, el esquema de la figura 3 no es válido porque fijaría  $v_s(t)$  en el terminal de base. Dado que  $v_s(t)$  va a ser pequeña (por ser pequeña señal), la unión base-emisor no estará encendida y además el punto de operación se movería con  $v_s(t)$ .

• El esquema de la figura 2 sí sería válido, ya que la pequeña señal se incorpora en corriente al terminal de base. Así tendríamos  $i_b(t) = I_{BQ} + i_s(t)$ , lo cual es coherente con el tratamiento matemático de pequeñas perturbaciones.

• El esquema de la figura 4 es válido siempre que no se reduzca al de la figura 2 (Norton  $\rightarrow$  Thévenin). Es decir,  $R_s$  no debe ser pequeña.

(c) En el caso del último circuito de excitación (figura 4), y con un valor de  $R_s$  que asegure funcionamiento correcto, calcule la expresión de la ganancia en pequeña señal usando el modelo mostrado en la figura 5.   
  $\uparrow$  desde la tensión de colector a  $i_s(t)$ .

$I_{CQ} \approx I_{SE} e^{V_{BEQ}/U_T}$   
 $I_{BQ} \approx \frac{I_{SE}}{\beta_F} e^{V_{BEQ}/U_T}$

$g_m = \frac{I_{CQ}}{U_T} \approx 33.8 \text{ mA/V}$   
 $r_{\pi} = \frac{\beta_F U_T}{I_{BQ}} = \frac{\beta_F U_T}{I_{CQ}} \approx 2.96 \text{ k}\Omega$

$\approx 33.8 \text{ mA/V}$   
 $\uparrow$   
 a temperatura ambiente  
 $\downarrow$   
 $\approx 2.96 \text{ k}\Omega$

$$i_s(t) \cdot R_s \parallel R_B = i_b(t) [R_s \parallel R_B + r_{\pi}] + R_E [i_b(t) + g_m r_{\pi} i_b(t)]$$

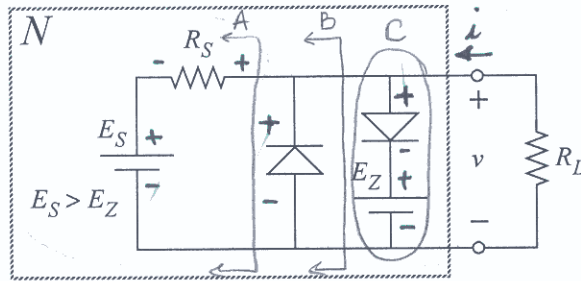
$$i_b(t) = \frac{R_s \parallel R_B}{R_s \parallel R_B + r_{\pi} + R_E (1 + g_m r_{\pi})} \cdot i_s(t)$$

$$v_o(t) = -g_m R_C v_{be}(t) = -g_m R_C r_{\pi} i_b(t) = -\frac{g_m r_{\pi} R_C}{\beta_F} \frac{R_s \parallel R_B}{R_s \parallel R_B + r_{\pi} + R_E (1 + g_m r_{\pi})} \cdot i_s(t)$$

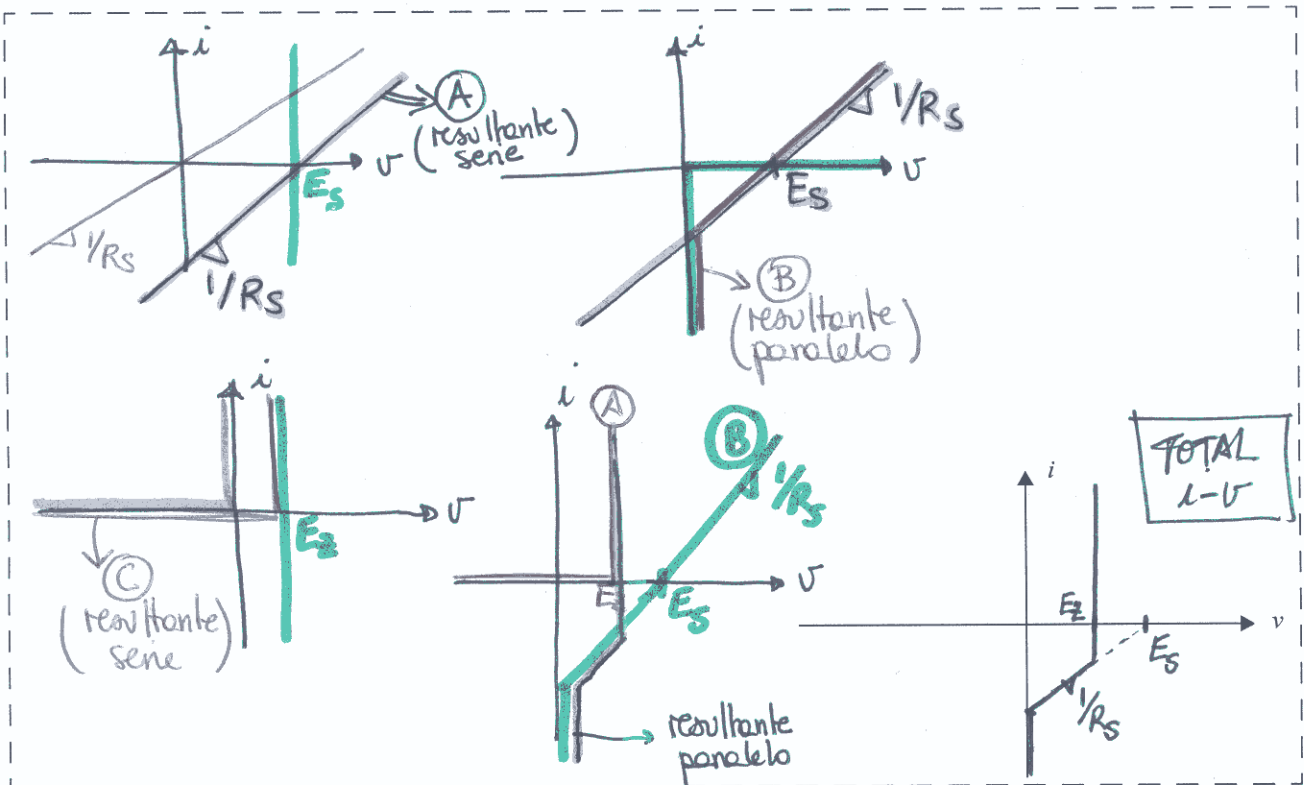
Para el caso, p.ej.,  $R_s = R_B$  se obtiene  $v_o(t) = -82.8 \times 10^3 \cdot i_s(t)$

**EJERCICIO 2**

Considere el circuito de la figura, en el que una red  $N$  está conectada a una resistencia de carga  $R_L$ .



(a) Determine la característica  $i-v$  de la red  $N$  suponiendo un modelo ideal para los diodos.

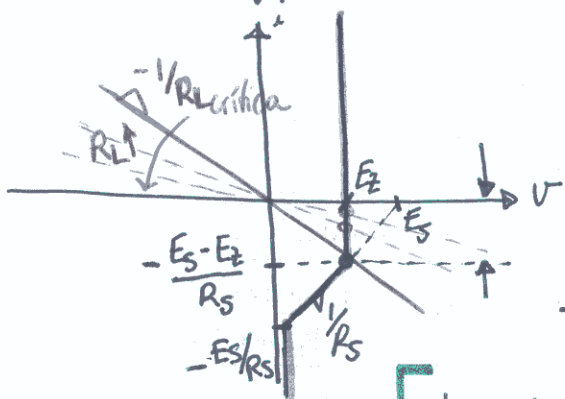


(b) Se pretende que, al conectar la red  $N$  con la resistencia de carga  $R_L$ , la tensión  $v$  entre los terminales de ésta sea  $E_Z$ .

¿Qué valor mínimo puede tener la resistencia de carga para que efectivamente se cumpla  $v = E_Z$ ?

¿Cuál es el valor máximo de corriente que puede proporcionar la red  $N$  a la resistencia de carga  $R_L$  cumpliendo  $v = E_Z$ ?

Recta de carga  $\Rightarrow i = -v/R_L$



En el tramo intermedio  $i = \frac{v-E_S}{R_S}$  ;

$i(E_Z) = \frac{E_Z - E_S}{R_S}$

Debe cumplirse que el punto de corte de la recta de carga con la característica  $i-v$  proporcione  $i \geq \frac{E_Z - E_S}{R_S}$

$-\frac{E_Z}{R_L} = \frac{E_Z - E_S}{R_S} \Rightarrow R_L \geq \frac{E_Z \cdot R_S}{E_S - E_Z}$

La corriente vista por  $R_L$  de acuerdo con el criterio de  $v$  sería  $-i$ , luego el valor máximo es  $(E_S - E_Z)/R_S$

**EJERCICIO 3**

Considere los dos circuitos con amplificadores operacionales mostrados en las figuras 1 y 2. Note que la diferencia entre ambas figuras radica sólo en la conexión de los terminales de entrada del amplificador operacional.

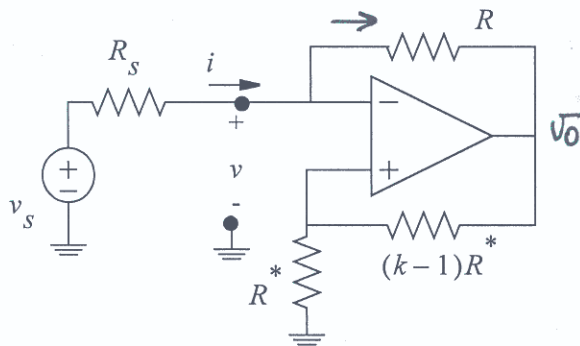


Figura 1

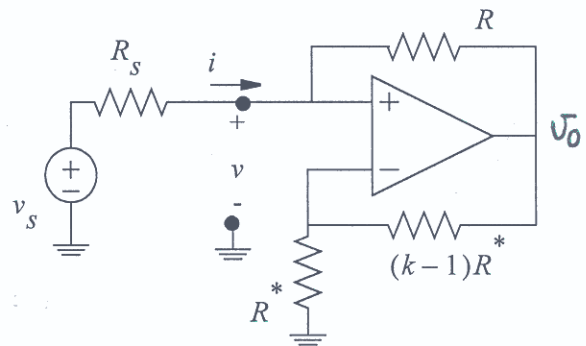


Figura 2

(a) Para cada uno de estos circuitos, calcule el rango de valores de  $R_s$  que garantiza funcionamiento estable en función de  $R$  y de  $k$ . Suponiendo que esta resistencia toma un valor incluido en dicho rango, obtenga:

- a.1) La relación entre  $i$  y  $v$ .
- a.2) La relación entre  $v$  y  $v_s$

FIGURA 1: 
$$v_- = \frac{R}{R_s + R} v_s + \frac{R_s}{R_s + R} v_o \Rightarrow v_- = \frac{R_s}{R_s + R} v_o$$

$$v_+ = \frac{R^*}{R^* + (k-1)R^*} v_o = \frac{v_o}{k} \Rightarrow v_+ = \frac{1}{k} v_o$$

para estabilidad del opamp en zona lineal  $v_- > v_+$

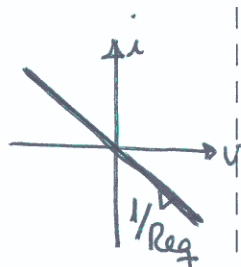
$$\frac{R_s}{R_s + R} > \frac{1}{k} \Rightarrow kR_s > R_s + R \Rightarrow \boxed{R_s > \frac{R}{k-1}}$$

Una vez garantizada  $R_s$  y asumiendo que el opamp trabaje en zona lineal:

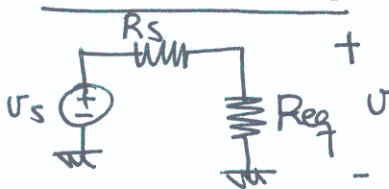
• RELACION  $i-v$ :

$$i = \frac{v - v_o}{R}; \quad v_+ = v_- = \frac{v_o}{k} = v \Rightarrow v_o = k v$$

$$\boxed{i = \frac{v - k v}{R} = \frac{(1-k) \cdot v}{R}} \Rightarrow \boxed{R_{eq} = -\frac{R}{k-1}}$$



• RELACION  $v-v_s$ :



$$v = \frac{R_{eq}}{R_s + R_{eq}} \cdot v_s = \frac{\frac{R}{1-k}}{R_s + \frac{R}{1-k}} \cdot v_s = \frac{R}{R + R_s(1-k)} \cdot v_s$$

$$\boxed{v = \frac{1}{1 - \frac{R_s}{R(k-1)}} \cdot v_s}$$

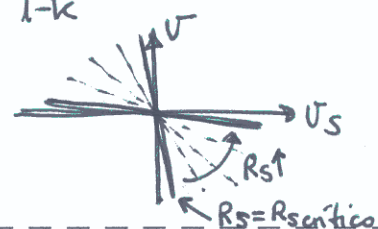


FIGURA 2: 
$$V_+ = \frac{R}{R+R_s} \cdot V_s + \frac{R_s}{R+R_s} V_0 \Rightarrow \beta_+ = \frac{R_s}{R+R_s}$$

$$V_- = \frac{R^*}{R^*+(K-1)R^*} V_0 \Rightarrow \beta_- = \frac{1}{K}$$

}  $\beta_- > \beta_+$   
para estabilidad

$$\frac{1}{K} > \frac{R_s}{R+R_s} \rightarrow R+R_s > KR_s \Rightarrow R_s < \frac{R}{K-1}$$

• RELACIÓN i-V:

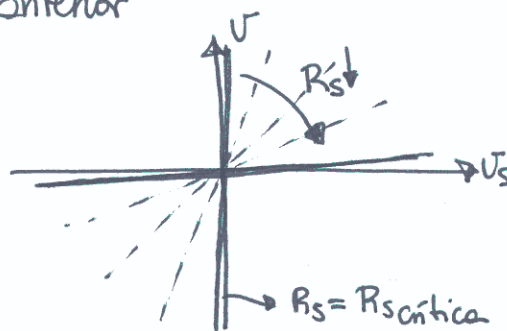
$$i = \frac{V-V_0}{R}; \quad V_- = V_+ = V = V_0/K \Rightarrow i = \frac{V-KV}{R} = -\frac{K-1}{R} V$$

semejante al caso anterior en la Fig. 1

• RELACIÓN V-V<sub>s</sub>:

Al igual que en el caso anterior

$$V = \frac{1}{1 - \frac{R_s}{R/(K-1)}} \cdot V_s$$



(b) Suponga que desea obtener una réplica de la intensidad  $i$  para atacar con ella a una resistencia de carga  $R_L$ , y que utiliza para ello el circuito mostrado en la figura 3:

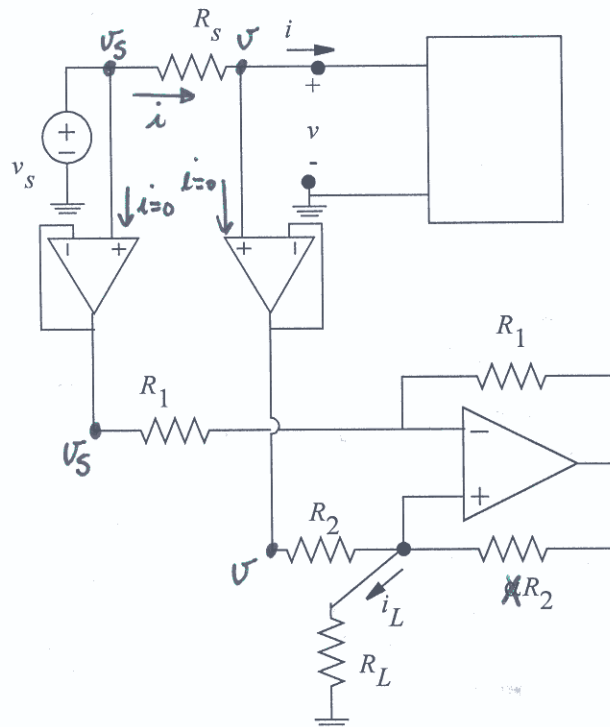
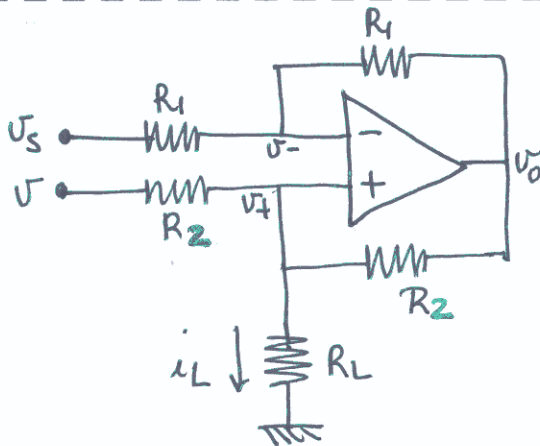


Figura 3

- b.1) ¿Qué valor deben tomar  $R_2$  para que se cumpla  $i_L = i$ ?
- b.2) ¿Qué condición debe cumplir  $R_2$  para que la operación de este nuevo circuito sea estable?
- b.3) Describa la funcionalidad de los seguidores de tensión dentro del circuito.



$i_{R_2}$ ?  
para  $i_L = i = \frac{V_S - V}{R_S}$

(1)  $V_- = \frac{V_S}{2} + \frac{V_0}{2}$

(2)  $V_+ = \frac{R_L // R_2}{R_L // R_2 + R_2} (V + V_0) = \frac{R_L}{2R_L + R_2} (V + V_0)$

$$\frac{\frac{R_L R_2}{R_L + R_2}}{\frac{R_L R_2}{R_L + R_2} + R_2} = \frac{R_L R_2}{R_L R_2 + R_2 (R_L + R_2)} = \frac{R_L R_2}{2R_L R_2 + R_2^2} = \frac{R_L}{2R_L + R_2}$$

- Asumimos estabilidad ( $p_- \rightarrow p_+$ , a demostrar posteriormente). Aplicamos tierra virtual ( $V_+ = V_-$ ) para despejar  $V_0$ , calcular  $V$  y aplicar después  $i_L = \frac{V_+}{R_L} = -\frac{V_S - V}{R_S}$

$$V_+ = V_- \Rightarrow \frac{R_L}{2R_L + R_2} (V + V_0) = \frac{1}{2} (V_S + V_0) \Rightarrow 2R_L (V + V_0) = (2R_L + R_2) (V_S + V_0)$$

$$2R_L V = (2R_L + R_2) V_S + R_2 V_0 \Rightarrow V_0 = \frac{2R_L}{R_2} V - \left(1 + \frac{2R_L}{R_2}\right) V_S$$

Substituyendo en  $V_-$ :

$$V_- = V_+ = \frac{V_S}{2} + \frac{V_0}{2} = \frac{V_S}{2} + \frac{R_L}{R_2} V - \left(\frac{1}{2} + \frac{R_L}{R_2}\right) V_S = \frac{R_L}{R_2} (V - V_S)$$

$$i_L = \frac{V_+}{R_L} = \frac{V - V_S}{R_2}; \text{ debe ser igual a } \frac{V - V_S}{R_S} \Rightarrow \boxed{R_2 = R_S \text{ para } i_L = -i}$$

- Condición para estabilidad:  $p_- \rightarrow p_+$

De (1) y (2)  $\left. \begin{matrix} p_- = 1/2 \\ p_+ = \frac{R_L}{2R_L + R_2} \end{matrix} \right\} \frac{1}{2} > \frac{R_L}{2R_L + R_2} \Rightarrow 2R_L + R_2 > 2R_L$

$\boxed{R_2 > 0}$

- Seguidores de tensión (buffers):

Necesarios para hacer una réplica de la tensión  $V_S - V$  a sensor sin alterar el valor de la corriente "i", gracias a la resistencia de entrada infinita que presentan ( $i = 0$ ).

**EJERCICIO 4**

Es común que los sistemas de audio contengan 2 o más altavoces con el propósito de que éstos manejen distintas partes del espectro en frecuencias. En una configuración de 3 canales (salida 3:1) se utilizan 3 altavoces, de forma que:

- uno de los ellos, el *woofer*, maneja las bajas frecuencias,
- otro altavoz, el *tweeter*, maneja las altas frecuencias, y
- un tercer altavoz, el *midrange*, maneja el rango medio de frecuencias del espectro de audio.

Estos altavoces forman parte de redes de filtrado que pueden presentar diseños muy diversos.

La figura 1 muestra una versión simple de un sistema de audio 3:1, mientras que la figura 2 muestra su esquemático equivalente.

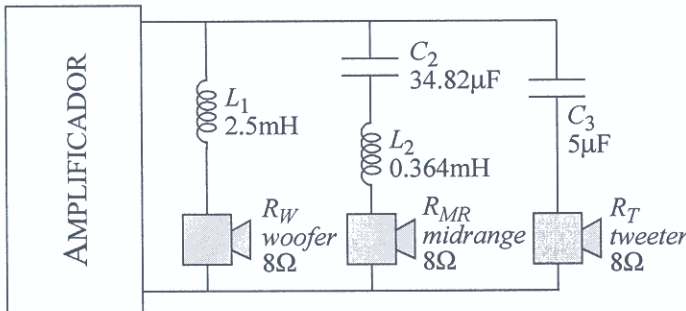


Figura 1

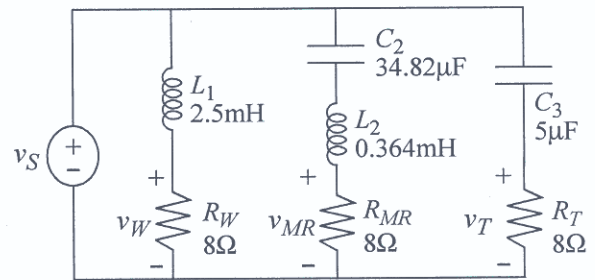


Figura 2

Determine las funciones de red  $H_W(s) = v_W(s)/v_S(s)$ ,  $H_{MR}(s) = v_{MR}(s)/v_S(s)$  y  $H_T(s) = v_T(s)/v_S(s)$ .

Dibuje los polos y ceros de las 3 funciones de red en el plano  $s$ .

Dibuje el diagrama de Bode asintótico de las 3 funciones de red.

¿Cuál es la frecuencia de corte de  $H_W(s)$ ? ¿Y de  $H_T(s)$ ? ¿Cuál es el ancho de banda de  $H_{MR}(s)$ ?

Handwritten solutions for the transfer functions:

$$H_W(s) = \frac{v_W(s)}{v_S(s)} = \frac{R_W}{R_W + sL_1} = \frac{1}{1 + \frac{s}{R_W/L_1}} \Rightarrow \text{Filtro paso de baja}$$

$$H_T(s) = \frac{v_T(s)}{v_S(s)} = \frac{R_T}{R_T + \frac{1}{sC_3}} = \frac{sR_TC_3}{1 + sR_TC_3} = R_TC_3 \frac{s}{1 + \frac{s}{R_TC_3}} \Rightarrow \text{Filtro paso de alta}$$

$$H_{MR}(s) = \frac{v_{MR}(s)}{v_S(s)} = \frac{R_{MR}}{R_{MR} + \frac{1}{sC_2} + sL_2} = \frac{sR_{MR}C_2}{1 + sR_{MR}C_2 + s^2L_2C_2} \Rightarrow \text{Filtro paso de banda}$$

Sustituyendo los valores de los elementos:

$$H_W(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{3.2 \text{Krad/s}}}; \quad H_T(s) = 4 \cdot 10^{-5} \frac{s}{1 + \frac{s}{25 \text{Krad/s}}}$$

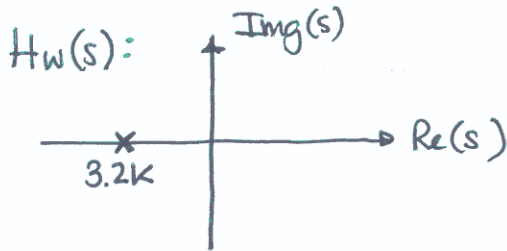
polo real en semiplano izquierdo a 3.2Krad/s (~0.5KHz)

ceros en DC ( $\omega=0$ ) y polo real en semiplano izquierdo a 25Krad/s (~4KHz)

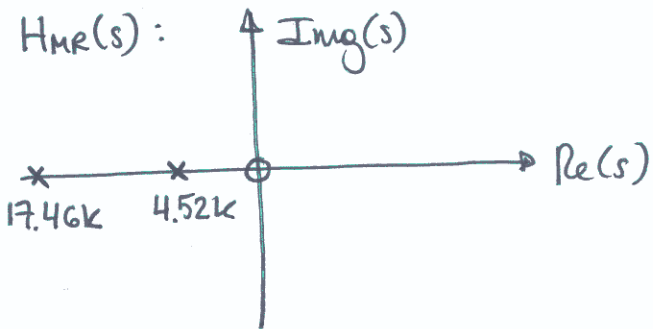
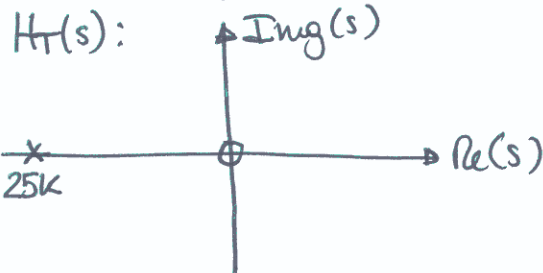
$$BW = \frac{R_{MR}C_2}{L_2C_2}$$

ganancia máxima 1 (diag. real)

$$H_{MR}(s) = \frac{278.56 \times 10^{-6} s}{1 + 278.56 \times 10^{-6} s + 12674.48 \times 10^{-12} s^2} = \frac{278.56 \times 10^{-6} s}{\left(1 + \frac{s}{4.52k}\right) \left(1 + \frac{s}{17.46k}\right)}$$



Cero en DC y 2 polos reales en semiplano izquierdo a  $4.52k\text{rad/s}$  ( $\sim 0.72\text{kHz}$ ) y  $17.46k\text{rad/s}$  ( $\sim 2.78\text{kHz}$ ).



$$|H_{MR}(j\omega)|_{\omega=1} = 278.56 \times 10^{-6} \text{ dB} = -71.1 \text{ dB}$$

Asintóticamente, en  $\omega = 4.52k\text{rad/s}$ , la amplitud será:  
 $-71.1 \text{ dB} + 20 \cdot \log\left(\frac{4.52k}{1}\right) = 2 \text{ dB}$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \sim 8.9k\text{rad/s} (\sim 1.42\text{kHz})$$

$$BW = \frac{R_{MR}}{L_2} \sim 22k\text{rad/s} (3.5\text{kHz})$$

