

**Examen de Electrónica 2**  
**11/08/2020**

Resolver cada problema en hojas separadas.

Duración de la prueba: 3 horas.

La prueba es **sin** material.

Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

**Problema 1: (37 puntos)**

Para el circuito de la Figura 1 calcule:

- Ganancia a frecuencias medias.
- Frecuencia de corte superior.
- Se plantea el circuito de la Figura 2 como alternativa. Repita las partes a) y b) para este circuito.
- ¿Cuál tiene mayor ancho de banda? ¿Por qué?
- ¿Cuál tiene mayor ganancia? ¿Por qué?

Datos:

Q1:  $C_{\mu} = 1 \text{ pF}$ ,  $C_{je} = 1 \text{ pF}$ ,  $f_T@25\text{mA} = 5 \text{ GHz}$ ,  $\beta = 250$ ,  $V_A = \infty$

$R_s = 220 \text{ } \Omega$ ,  $R_L = 2.7 \text{ k}\Omega$ ,  $I_1 = 2 \text{ mA}$ ,  $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ .

$V_{cc}$  y  $V_{in}$  son tales que Q1 opera siempre en zona activa.

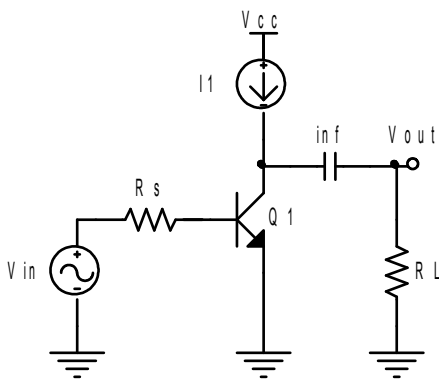


Figura 1

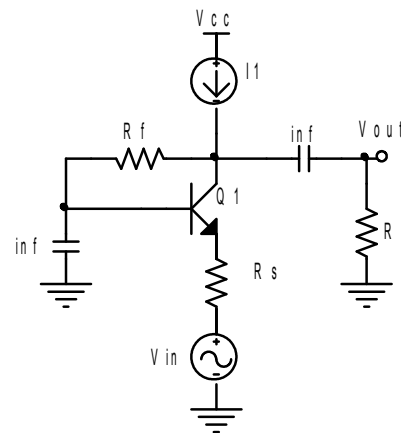


Figura 2

**Problema 2: (37 puntos)**

Para el oscilador Clapp de la Figura 1 calcule:

- a) Frecuencia y condición de oscilación, condición de arranque. Dar las expresiones literales y su valor numérico.
- b) Si  $V_{DD} = 5V$  calcule la amplitud de las oscilaciones. Indique claramente que curvas y valores de la gráfica de la Figura 2 fueron usados.
- c) Si se baja el valor de  $V_{DD}$  a  $V_{DD} = 4V$ , ¿el oscilador arranca? Justifique.
- d) ¿Cual es la nueva amplitud de las oscilaciones?

Datos: Los condensadores  $C4$  y  $C5$  al igual que  $L2$  se podrán considerar infinitos,  $V_{BE} = 0,7 V$ .

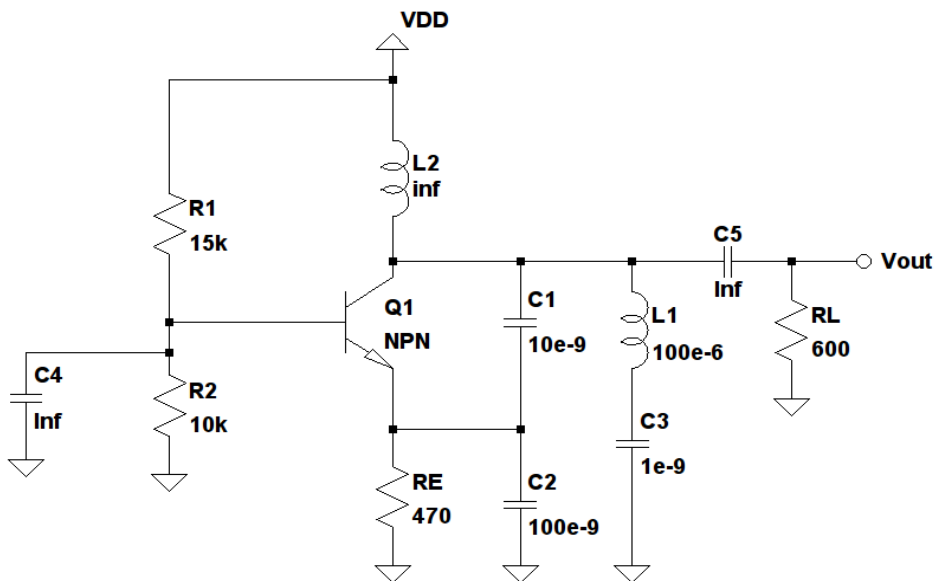


Figura 1

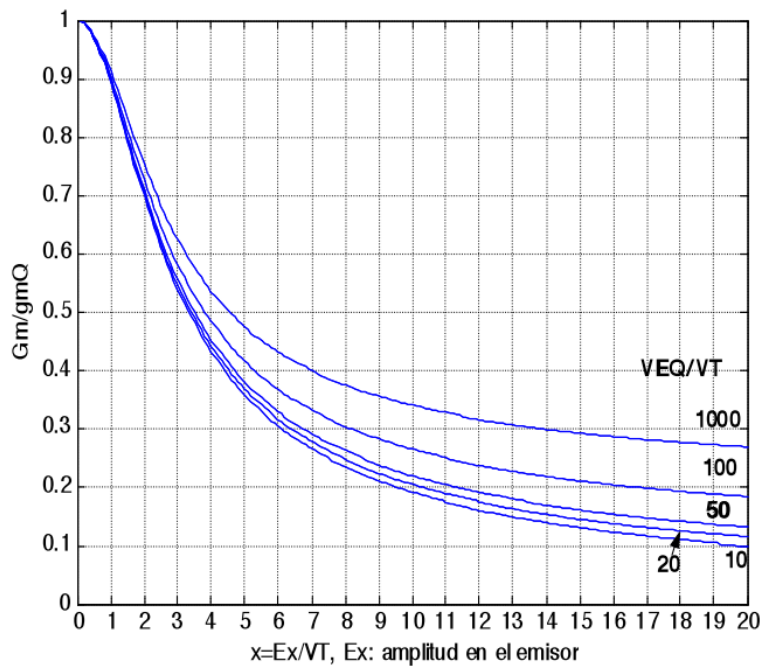


Figura 2

**Pregunta : (26 puntos)**

Sea el amplificador de potencia de la Figura 1.

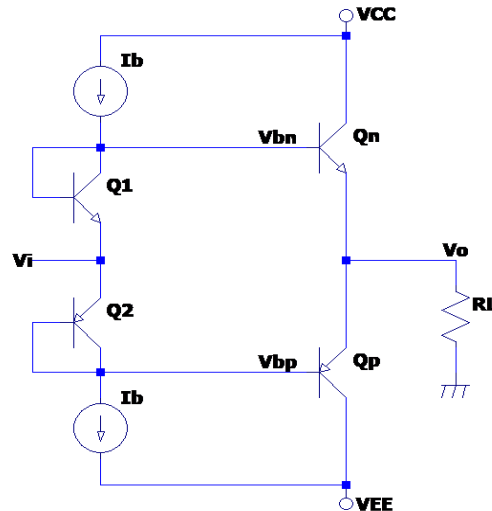


Figura 1

Los transistores Q1, Q2, Qn y Qp tienen las mismas características, con  $\beta = 20$ ,  $V_{CEsat} = 0$  V y la misma área de juntura.

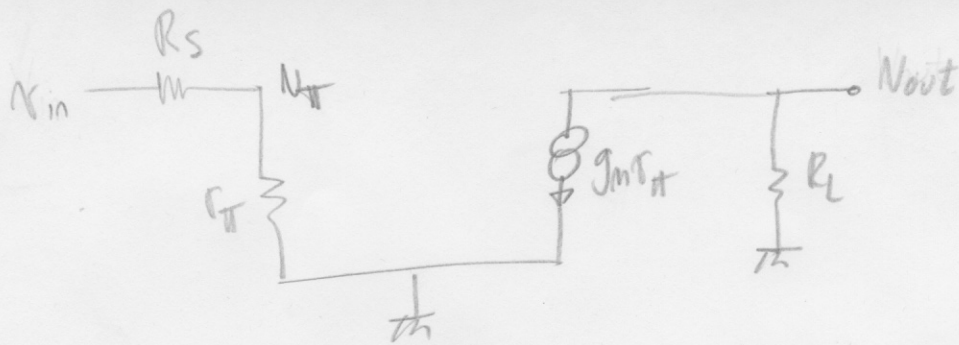
Se asume que las fuentes de corriente dan una corriente constante independiente del voltaje entre sus bornes.

Datos:

$V_{CC} = -V_{EE} = 12$  V,  $R_L = 8$   $\Omega$ ,  $T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$ ,  $R_{ja} = 70$   $^\circ\text{C/W}$ ,  $R_{jc} = 1,67$   $^\circ\text{C/W}$

- ¿Cuánto deben valer las fuentes de corriente  $I_b$  para poder dar a la salida una senoide de la máxima amplitud de pico?
- Calcular la corriente de emisor de los transistores Q1, Q2, Qn y Qp cuando  $V_i = 0$  y considerando el mínimo valor de  $I_b$  necesario hallado en la parte a).
- ¿De qué clase es el amplificador de potencia? Justificar.
- ¿Cual es la potencia máxima que deben disipar cada uno de los transistores Qn y Qp ?
- Si se desea que el circuito pueda funcionar correctamente a una temperatura ambiente máxima de  $50^\circ\text{C}$ , ¿Es necesario colocar disipadores? En caso afirmativo, calcular la resistencia térmica máxima que deben tener los disipadores (uno para cada transistor) asumiendo  $R_{cs} = 1$   $^\circ\text{C/W}$ .

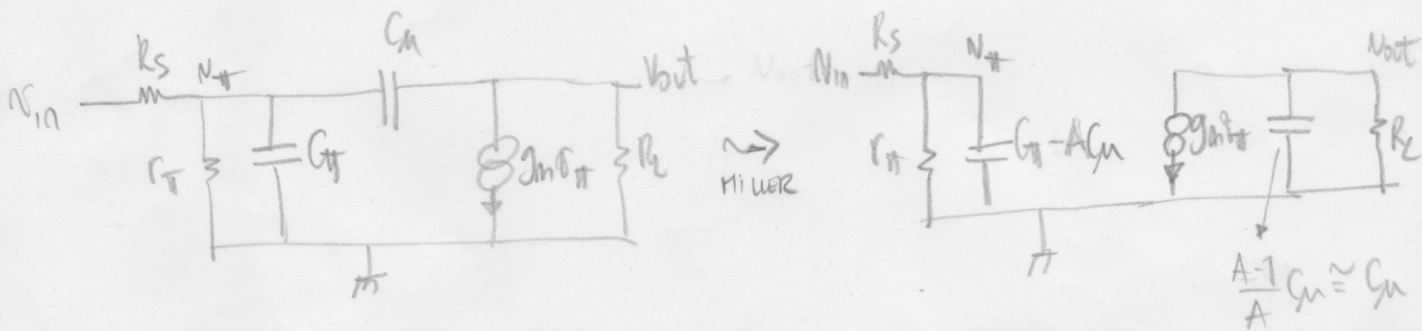
(a)



$$\begin{aligned}
 V_{\pi} &= \frac{r_{\pi}}{R_s + r_{\pi}} N_{in} \\
 -\frac{N_{out}}{R_L} &= g_m V_{\pi}
 \end{aligned}
 \Rightarrow -\frac{N_{out}}{R_L} = g_m \frac{r_{\pi}}{R_s + r_{\pi}} N_{in} \Rightarrow \boxed{\frac{N_{out}}{N_{in}} = -g_m R_L \cdot \frac{r_{\pi}}{R_s + r_{\pi}} \approx -1}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta V_T}{I_1} = 3,25 \text{ k}\Omega \Rightarrow \boxed{\frac{N_{out}}{N_{in}} = -195 \frac{\text{V}}{\text{V}}} \text{ ganancia}$$

(b)



Aplica Miller:  $A = -195 \frac{\text{V}}{\text{V}} \gg 1$ ,  $C_2 = C_{\mu} - AC_{\mu}$

$$N_{\pi} = \frac{r_{\pi} \parallel \frac{1}{C_{\pi} s}}{R_s + r_{\pi} \parallel \frac{1}{C_{\pi} s}} N_{in} = \frac{r_{\pi}}{1 + C_{\pi} r_{\pi} s} N_{in} = \frac{r_{\pi}}{R_s (1 + C_{\pi} s) + r_{\pi}} N_{in}$$

$$-\frac{N_{out}}{R_L \parallel \frac{1}{C_{\mu} s}} = g_m V_{\pi} \Rightarrow N_{out} = -g_m \cdot \left( \frac{R_L}{1 + R_L C_{\mu} s} \right) N_{\pi}$$

$$\Rightarrow N_{out} = \frac{-r_{\pi} \cdot g_m R_L \cdot N_{in}}{(R_s + r_{\pi} + R_s r_{\pi} C_{\pi} s) (1 + R_L C_{\mu} s)} \Rightarrow \frac{N_{out}}{N_{in}} = \frac{-r_{\pi}}{R_s + r_{\pi}} \cdot \frac{g_m R_L}{(1 + \frac{R_s r_{\pi} C_{\pi} s}{R_s + r_{\pi}}) (1 + R_L C_{\mu} s)}$$

$$\omega_1 = \frac{R_s + r_{\pi}}{R_s r_{\pi} C_{\pi}} = \frac{R_s + r_{\pi}}{R_s r_{\pi} (C_{\pi} - \Delta C_{\pi})} \approx \frac{1}{R_s / 4 C_{\pi}} \Rightarrow f_1 = 3,9 \text{ MHz}$$

↳ free de corte superior

$$\omega_2 = \frac{1}{R_L C_{\mu}} \Rightarrow f_2 = 59 \text{ MHz}$$

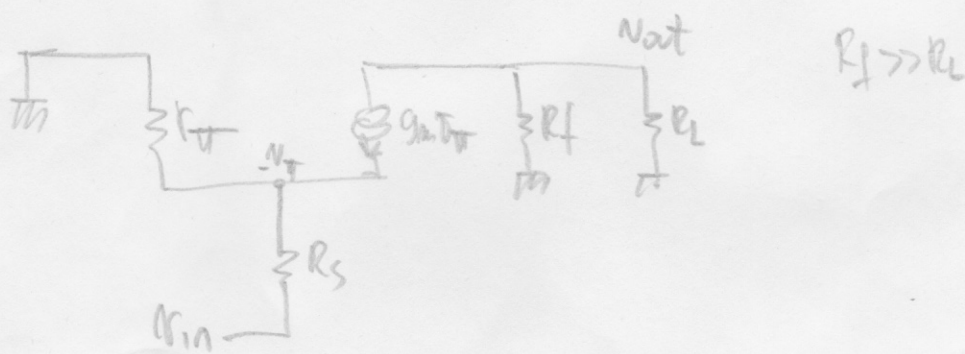
Cálculo de  $C_{\pi}$ :

$$\omega_{\beta} \frac{1}{f_{\beta}} = \frac{g_m}{C_{\mu} + C_{\pi}} \Rightarrow C_{\mu} + C_{\pi} = \frac{g_m}{2\pi f_{\beta}} = 31 \text{ pF} \Rightarrow C_{\pi} @ 25\text{mA} = 30 \text{ pF}$$

$$C_{\pi} = C_{je} + K I \Rightarrow 30 \text{ pF} = 1 \text{ pF} + K (25 \text{ mA}) \Rightarrow K = 1,1 \times 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{A}}$$

$$C_{\pi} @ 2 \text{ mA} = 1 \text{ pF} + K (2 \text{ mA}) = 3,4 \text{ pF} \Rightarrow \boxed{C_{\pi} = 3,4 \text{ pF}}$$

©



$$\frac{-v_{out}}{R_L} = g_m v_{\pi}$$

$$\frac{v_{in} + v_{\pi}}{R_s} = \frac{-v_{\pi}}{r_{\pi}} - g_m v_{\pi} \approx g_m v_{\pi} \Rightarrow r_{in} = (-1 + g_m R_s) r_{\pi}$$

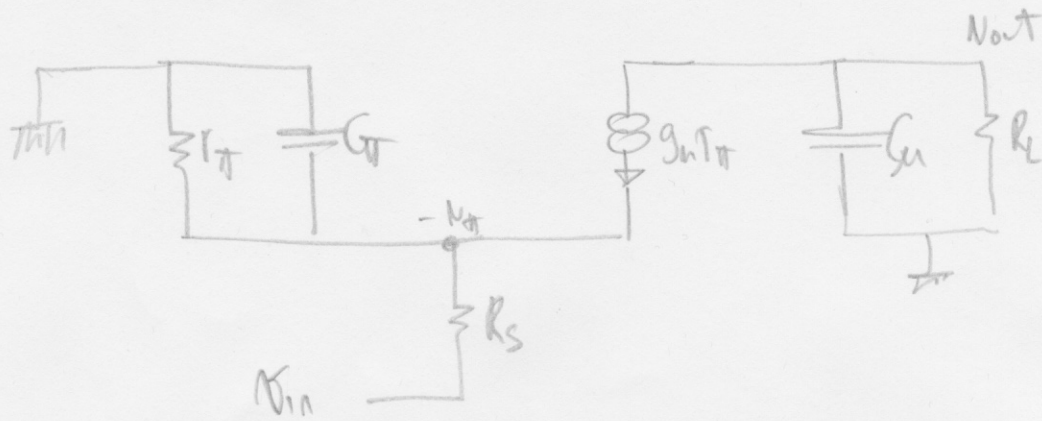
$$\Rightarrow -v_{out} = \frac{g_m R_L v_{in}}{g_m R_s}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_L}{R_s} = 12 \frac{\text{V}}{\text{V}}}$$

ganancia

+

© cont.



$$\frac{v_{in} + v_{\pi}}{R_S} + g_m v_{\pi} = \frac{-v_{\pi} (1 + r_{\pi} C_{\pi} s)}{r_{\pi}} \Rightarrow \frac{v_{in}}{R_S} = -v_{\pi} \left( \frac{1}{R_S} + g_m + \frac{1 + r_{\pi} C_{\pi} s}{r_{\pi}} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{in} = -v_{\pi} \left( 1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_{\pi}} (1 + r_{\pi} C_{\pi} s) \right) = \frac{-v_{\pi}}{r_{\pi}} \left( r_{\pi} + g_m r_{\pi} R_S + R_S + R_S r_{\pi} C_{\pi} s \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-r_{\pi}}{g_m r_{\pi} R_S + R_S + r_{\pi} + R_S r_{\pi} C_{\pi} s}$$

$$g_m v_{\pi} = \frac{-v_{out} (1 + R_L C_{\pi} s)}{R_L} \Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{\pi}} = \frac{-g_m R_L}{1 + R_L C_{\pi} s}$$

$$\omega_1 = \frac{g_m r_{\pi} R_S + R_S + r_{\pi}}{R_S r_{\pi} C_{\pi}} \approx \frac{g_m r_{\pi} R_S + r_{\pi}}{R_S r_{\pi} C_{\pi}} \approx \frac{g_m R_S + 1}{R_S C_{\pi}} \stackrel{g_m R_S \gg 1}{\approx} \frac{g_m}{C_{\pi}} \Rightarrow f_1 = 3.6 \text{ GHz}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_L C_{\pi}} \Rightarrow \boxed{f_2 = 59 \text{ kHz}} \text{ freq. de corte superior}$$

d) El circuito de la figura 2 (2) tiene mayor ancho de banda.

Esto se debe a q' la base de  $Q_1$  está a tierra y por tanto  $C_u$  tiene una de sus terminales a tierra. De este modo se evita el efecto miller en (2). En (1) esto no pasa y  $C_u$  "pasa" a la entrada multiplicado por un factor aprox. de 200, determinando el ancho de banda.

e) El circuito de la figura 1 (1) tiene mejor ganancia. Esto se debe a que no tiene resistencia de emisor (observar que  $R_S$  en el (2) actúa como resistencia de emisor).

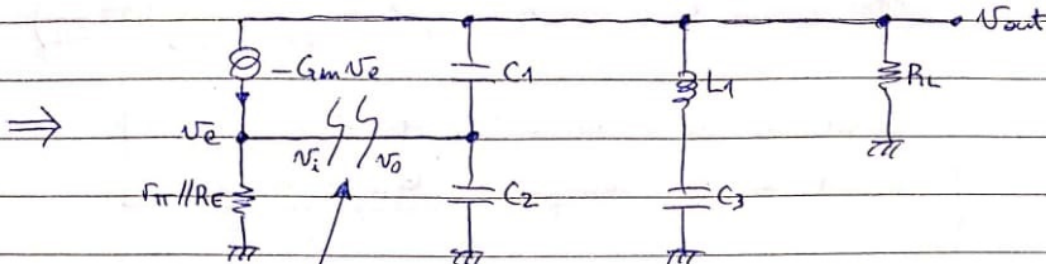
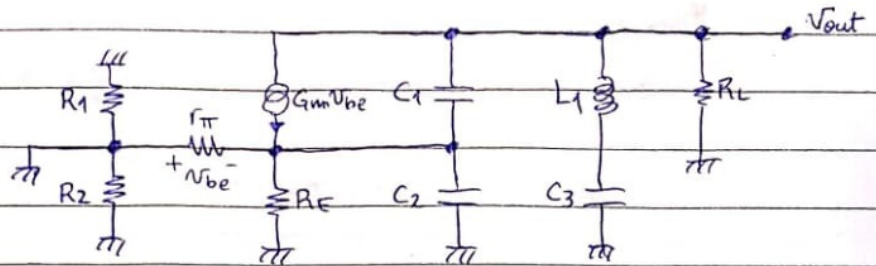
NOTA: observar que la falta de  $R_{emisor}$  en (1) repercute en un menor ancho de banda,

Examen de Electrónica 2 - agosto 2020

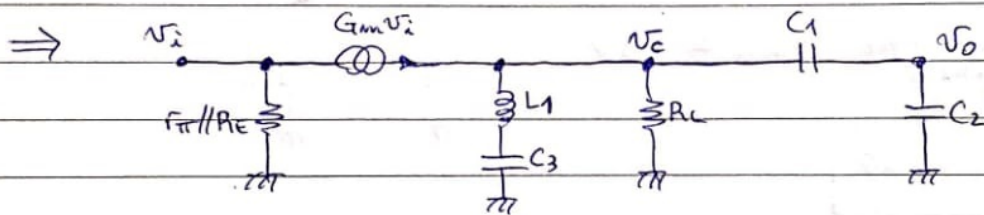
Problema 2

a) Circuito en señal:

- $\left\{ \begin{array}{l} C_4 \text{ y } C_5 \text{ cortocircuitos} \\ L_2 \text{ circuito abierto} \end{array} \right.$



abre el lazo y asumo  $R_V \gg \frac{1}{\omega_{osc} C_2}$  con  $R_V = F_{\pi} // R_E // G_m^{-1}$



$$V_o = \underbrace{\left( \frac{1}{j\omega C_2} \right)}_{\frac{V_o}{V_c}} \left[ \underbrace{\left( (j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_3}) // R_L // \left( \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \right)}_{\frac{V_c}{G_m V_i}} \right] (G_m V_i)$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) G_m \left( \frac{1}{\frac{1}{R_L} + \frac{j\omega C_3}{1 - \omega^2 L_1 C_3} + j\omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \right)$$

$$\Im \left\{ \frac{V_o}{V_i} \right\} = 0 \Rightarrow \frac{\omega C_3}{1 - \omega^2 L_1 C_3} + \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 0$$

$$\omega^2 L_1 C_3 - 1 = C_3 \left( \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_3} \left( 1 + \frac{C_3}{C_2} \right)}}$$

con  $C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

$$\Re \left\{ \frac{V_o}{V_i} \right\} = 1 \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{C_1}{C_1 + C_2} G_m R_L = 1}$$

Condición de oscilación



# Examen de Electrónica 2 - agosto 2020

## Problema 2

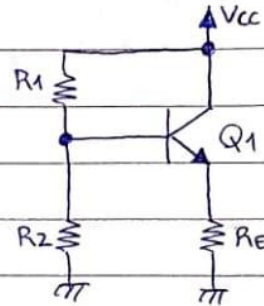
Condición de arranque:  $\operatorname{Re}\left\{\frac{v_o}{v_i}\right\} > 1$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{C_1}{C_1 + C_2} G_m R_L > 1}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Frecuencia de oscilación: } f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_3} \left(1 + \frac{C_3}{C_{12}}\right)} = \boxed{530 \text{ kHz}} \\ \text{Condición de oscilación: } \boxed{G_m = 18,33 \text{ mS}} \\ \text{Condición de arranque: } \boxed{G_m > 18,33 \text{ mS}} \end{array} \right.$$

b) Circuito en DC:

$$V_{EQ} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC} - V_{BEon} = 1,3 \text{ V}$$



$$\boxed{\frac{V_{EQ}}{V_T} = \frac{1,3 \text{ V}}{26 \text{ mV}} = 50}$$

$$g_{mQ} = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{V_{EQ}}{R_E V_T} = \frac{(1,3 \text{ V})}{(470 \Omega)(26 \text{ mV})} = 106,4 \text{ mS}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{G_m}{g_{mQ}} = \frac{18,33 \text{ mS}}{106,4 \text{ mS}} = 0,172}$$

De la figura 2 con  $V_{EQ}/V_T = 50$  y  $G_m/g_{mQ} = 0,172$ ,

se tiene  $x = E_x/V_T \approx 13,5 \Rightarrow E_x = x V_T$

$$\Rightarrow E_T = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1}\right) E_x = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1}\right) x V_T = \boxed{3,86 \text{ V}}$$

c) En el arranque,  $G_m = g_{mQ} = \frac{V_{EQ}}{R_E V_T} = \frac{1}{R_E V_T} \left(\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC} - V_{BEon}\right)$

$$G_m = \frac{(0,9 \text{ V})}{(470 \Omega)(26 \text{ mV})} = 73,65 \text{ mS}$$

Como  $G_m > 18,33 \text{ mS}$  (condición de arranque),  
el oscilador arranca.

Examen de Electrónica 2 - agosto 2020

Problema 2

$$d) V_{EQ} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} - V_{BEon} = 0,9 \text{ V} \Rightarrow \boxed{\frac{V_{EQ}}{V_T} = \frac{0,9 \text{ V}}{26 \text{ mV}} = 34,6}$$

$$g_{mq} = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{V_{EQ}}{R_E V_T} = \frac{(0,9 \text{ V})}{(470 \Omega)(26 \text{ mV})} = 73,65 \text{ mS}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{G_m}{g_{mq}} = \frac{18,33 \text{ mS}}{73,65 \text{ mS}} = 0,249}$$

De la figura 2 con  $G_m/g_{mq} = 0,249$ , se tiene

$x$  entre 8 (curva  $V_{EQ}/V_T = 20$ ) y 8,5 (curva  $V_{EQ}/V_T = 50$ ),

$$\Rightarrow E_T = \left( \frac{C_1 + C_2}{C_1} \right) x V_T$$

La amplitud está entre 2,29 V y 2,43 V.

$$\text{@ } \frac{V_{EQ}}{V_T} = 20$$

$$\text{@ } \frac{V_{EQ}}{V_T} = 50$$

## Pregunta

a) ¿Cuánto deben valer las fuentes de corriente  $I_b$  para poder dar a la salida una senoide de la máxima amplitud de pico?

La máxima amplitud de pico es  $V_{CC} - V_{CEsat} = V_{CC} = 12\text{ V}$ .

Pico positivo:

$$I_b = I_{E1} + I_{Bn} = I_{E1} + I_{En}/(\beta+1) = I_{E1} + V_{op}/R_L/(\beta+1)$$

$$I_{E1} > 0 \Rightarrow I_b > V_{op}/R_L/(\beta+1)$$

$$I_b > V_{CC}/R_L/(\beta+1) = (12\text{ V})/(8\ \Omega)/(10+1) = 136.4\text{ mA}$$

Análogamente, se tiene lo mismo para el pico negativo, y la fuente de corriente debe tener el mismo valor.

$$\Rightarrow I_b > 136.4\text{ mA}$$

b) Calcular la corriente de emisor de los transistores  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_n$  y  $Q_p$  cuando  $V_i = 0$ .

Cuando  $V_i = 0\text{ V}$ , se tiene que  $V_o = 0\text{ V}$  y entonces no hay corriente por  $R_L$ .

$$\Rightarrow I_{En} = I_{Ep} \Rightarrow V_{BEn} = V_{EBp}$$

$$\text{A su vez, } I_{E1} = I_b - I_{En}/(\beta+1), \text{ e } I_{E2} = I_b - I_{Ep}/(\beta+1) \Rightarrow I_{E1} = I_{E2} \Rightarrow V_{BE1} = V_{BE2}$$

$$\text{Malla entre } V_{bn} \text{ y } V_{bp}: V_{BE1} + V_{BE2} = V_{BEn} + V_{EBp} \Rightarrow V_{BE1} = V_{BEn} = V_{BE2} = V_{EBp}$$

$$\Rightarrow I_{E1} = I_{E2} = I_{En} = I_{Ep} = I_{E0}$$

$$I_b = I_{E1} + I_{Bn} = I_{E1} + I_{En}/(\beta+1) = I_{E0} + I_{E0}/(\beta+1) = I_{E0} * (\beta+2)/(\beta+1)$$

$$\Rightarrow I_{E0} = I_b * (\beta+1)/(\beta+2) = (136.4\text{ mA}) * (10+1)/(10+2) = 125\text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{E1} = I_{E2} = I_{En} = I_{Ep} = 125\text{ mA}$$

c) ¿De qué clase es el amplificador de potencia? Justificar.

El amplificador es de clase AB porque los transistores de potencia  $Q_n$  y  $Q_p$  conducen durante más de  $180^\circ$  pero menos de  $360^\circ$ .

d) En el peor caso, los transistores  $Q_n$  y  $Q_p$  disipan  $2\text{ W}$  cada uno. Si se desea que el circuito pueda funcionar correctamente a una temperatura ambiente máxima de  $50^\circ\text{C}$ , ¿Es necesario colocar disipadores? En caso afirmativo, calcular la resistencia térmica máxima que deben tener los disipadores (uno para cada transistor) asumiendo  $R_{cs}=1\text{ K/W}$ .

$$T_j = T_a + P * R_{ja} = 50^\circ\text{C} + (2\text{ W}) * (57\text{ K/W}) = 164^\circ\text{C}$$

$\Rightarrow T_j$  supera  $T_{jmax} = 150^\circ\text{C} \Rightarrow$  es necesario colocar disipadores.

$$T_j = T_a + P * (R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}) < T_{jmax}$$

$$R_{sa} < (T_{jmax} - T_a)/P - R_{jc} - R_{cs} = (150^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})/(2\text{ W}) - 1,57\text{ K/W} - 1\text{ K/W}$$

$$R_{sa} < 47,43\text{ K/W}$$