

Amplificadores de Audio

Trabajo práctico 2

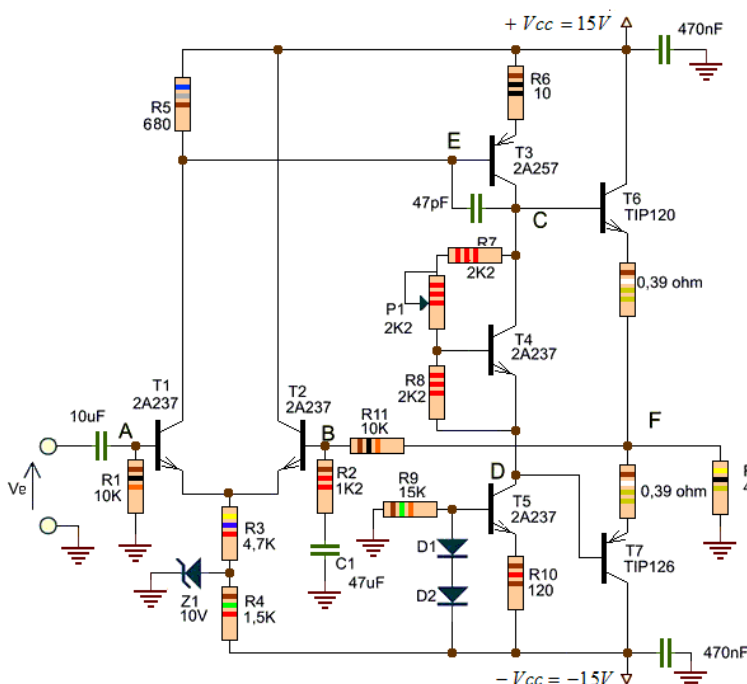
Problema 11

Cátedra: CIRCUITOS ELECTRÓNICOS II

CIRCUITOS ELECTRÓNICOS II

Trabajo práctico N° 2 Problema N°11

Para el amplificador de audiofrecuencias, de gran señal, con par complementario de salida, alimentado con $\pm V_{cc} = \pm 15\text{ V}$, y mostrado en la figura, se requiere:



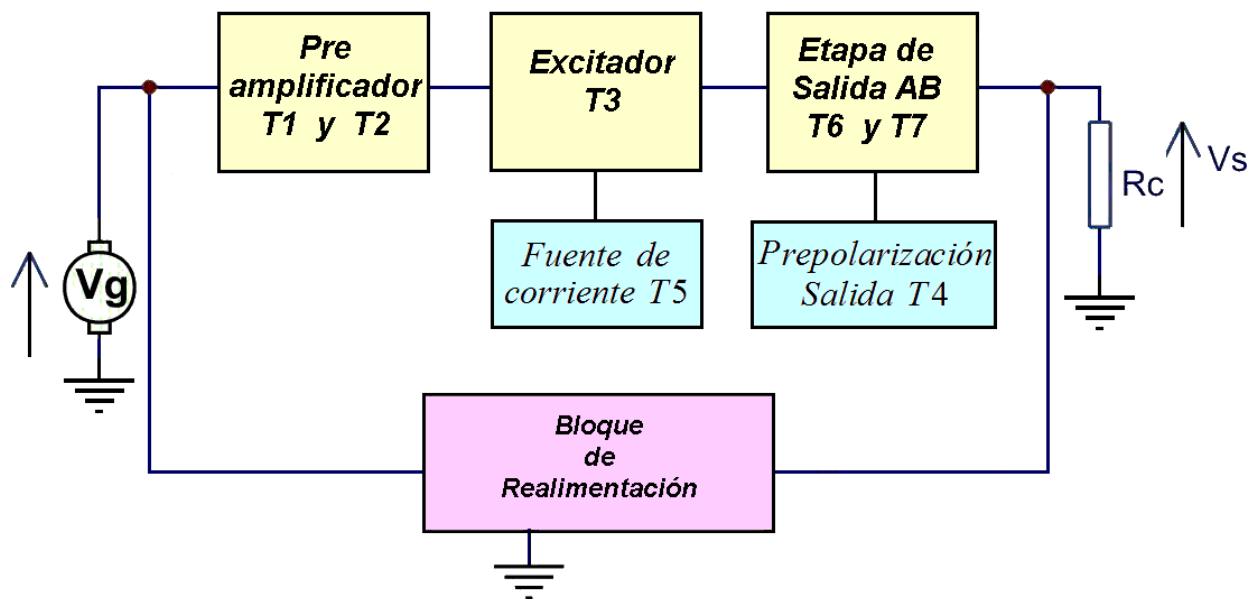
- Dibujar un diagrama en bloques del circuito.
- Determinar el tipo y la topología de realimentación.
- Calcular la ganancia de tensión del amplificador.
- Calcular el potencial estático en los puntos indicados: A, B, C, D, E y F.
- Calcular la $P_{sm\acute{a}x}$, $P_{Dm\acute{a}x}$ y el pico de tensión de la señal de entrada, para obtener la $P_{sm\acute{a}x}$.
- Determinar el valor de capacidad necesario para tener una frecuencia cuadrantal inferior de 10 Hz.
- Calcular la θ_{D-A} necesaria para que el circuito trabaje a una temperatura ambiente de 35°C .

Cuestionario:

¿Qué ventajas tiene la configuración en clase AB con respecto a los rendimientos de potencia?

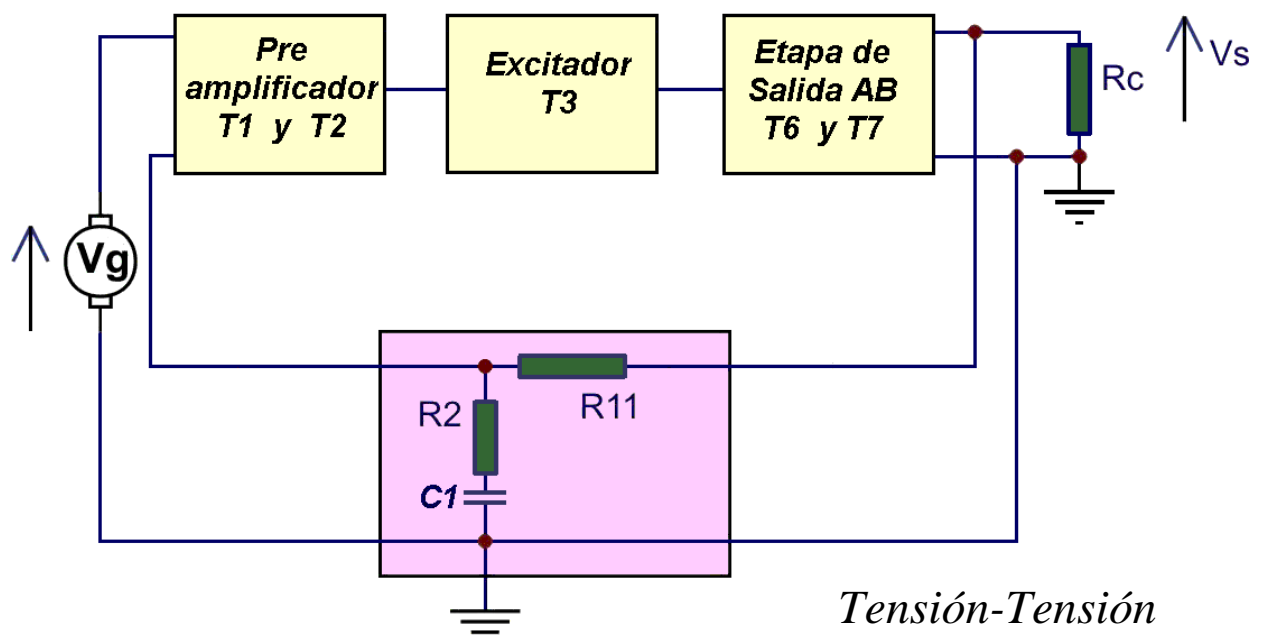
¿A qué se debe la distorsión por cruce? ¿De qué manera se puede eliminar?

a) Dibujar un diagrama en bloques del circuito.



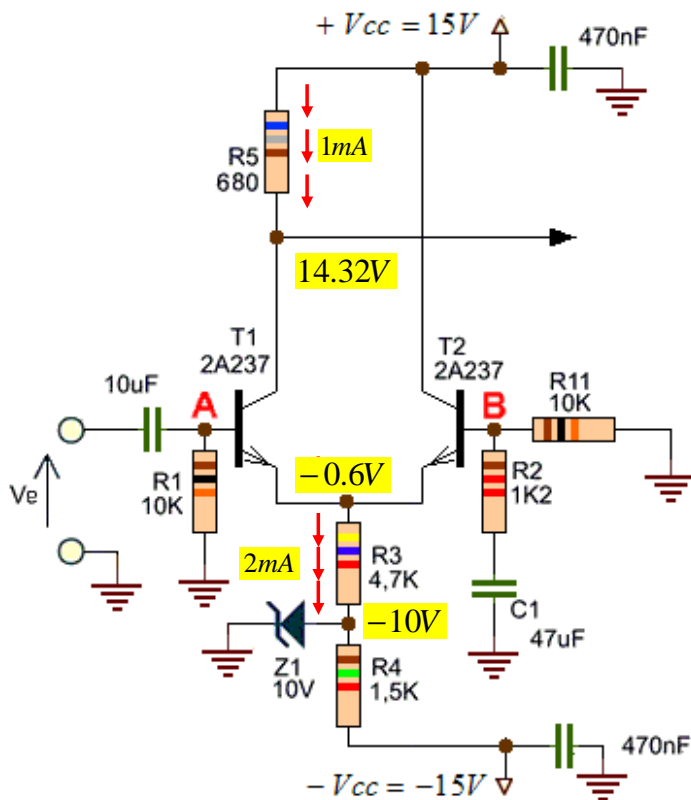
3

b) Determinar el tipo y la topología de realimentación.



4

d) Calcular el potencial estático en los puntos A y B



Suponiendo a la corriente I_{BT1-2} despreciable

$$V_{ET1} = -0.6V$$

Suponiendo al diodo zener bien polarizado

$$V_{R3} = 9.4V$$

$$\Rightarrow I_{EE} = \frac{V_{R3}}{R_3} = 2mA$$

$$\Rightarrow I_{R4} = \frac{5V}{R_4} = 3.3mA \Rightarrow I_{DZ} = 1.3mA$$

$$I_{Q1} = I_{Q2} = 1mA \quad V_{CT1} = 14.32V$$

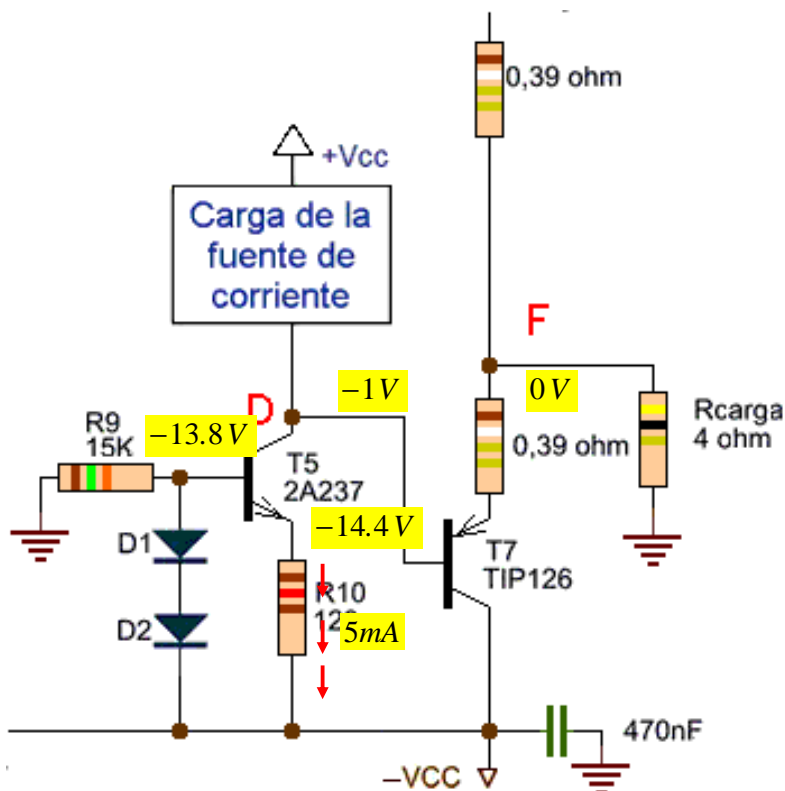
$$I_{BT1} = \frac{1mA}{H_{FE}} = 3.3\mu A$$

$$V_A = V_B = 33mV \approx 0V$$

Fac. Ingeniería UNLP

5

d) Calcular el potencial estático en los puntos D y F



$$V_F = 0V$$

$$V_D = V_F - 1V = -1V$$

$$V_{BT5} = (1.2 - 15)V = -13.8V$$

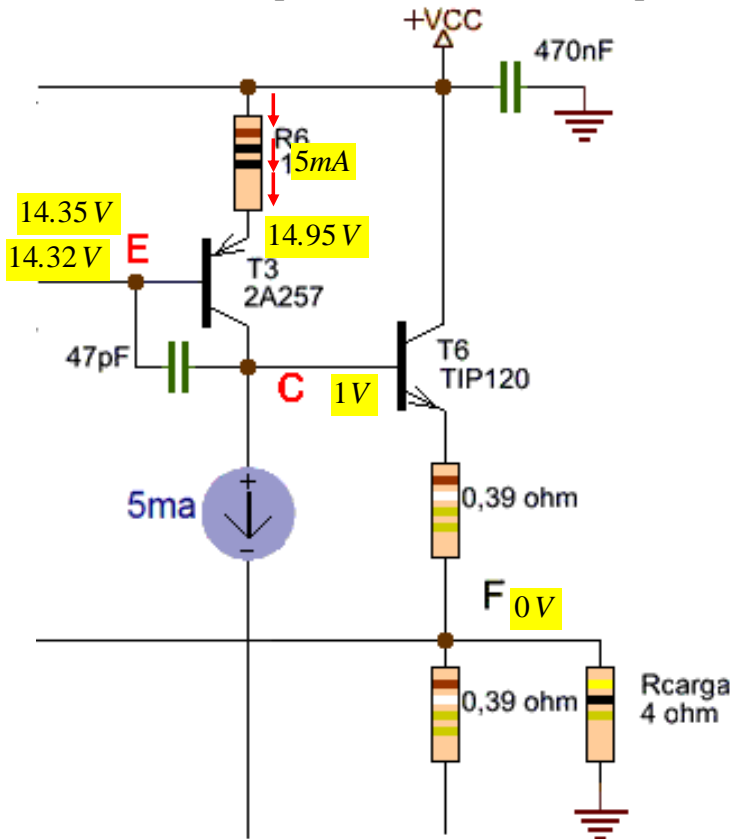
$$V_{ET5} = (-13.8 - 0.6)V = -14.4V$$

$$I_{ET5} \approx I_{CT5} = \frac{0.6}{120} A = 5mA$$

Fac. Ingeniería UNLP

6

d) Calcular el potencial estático en los puntos C y E



$$V_{ET3} = 15V - 5mA \cdot 10\Omega = 14.95V$$

$$V_{BT3} = (14.95 - 0.6)V = 14.35V$$

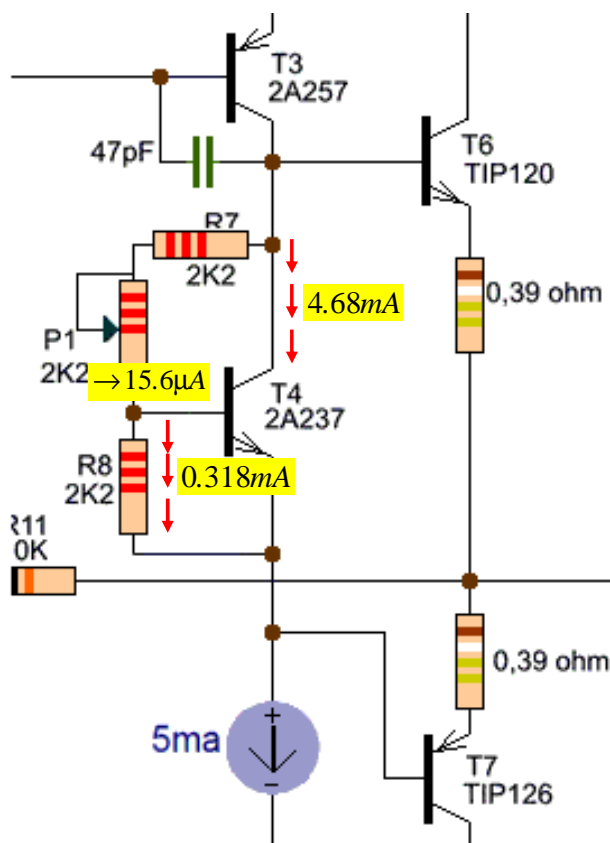
$$V_E = 14.35V \cong 14.32V$$

$$V_C = V_F + 1V = 1V$$

Fac. Ingeniería UNLP

7

Fuente de prepolarización de los transistores de salida



Suponemos $I_{R8} \gg I_{BT4}$

$$\Rightarrow I_{R8} = I_{R7} = \frac{0.7V}{2.2k\Omega} = 0.318mA$$

$$I_{CT4} = (5 - 0.318)mA = 4.68mA$$

$$I_{BT4} = \frac{4.68mA}{h_{FE}} = 15.6\mu A$$

$$I_{BT4} = 15.6\mu A \ll 0.3mA = I_{R8}$$

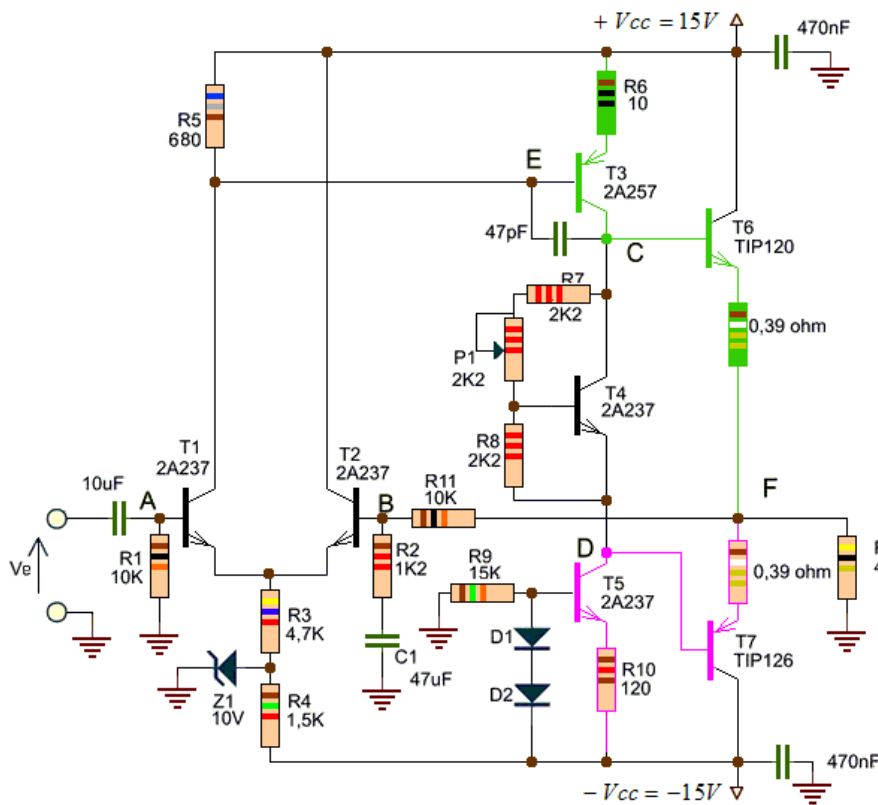
$$\bar{V}_{CD} = I_{R8}(R_7 + P_1 + R_8) = 2.1V$$

$$\underline{V}_{CD} = I_{R8}(R_7 + R_8) = 1.4V$$

Fac. Ingeniería UNLP

8

e) 1 - Calcular la Potencia de salida máxima.



Fac. Ingeniería UNLP

$$\overline{P_S} = \overline{V_{ef}} \cdot \overline{I_{ef}} = \frac{\hat{V}_{ca} \cdot \hat{I}_{ca}}{2} = \frac{\hat{V}_{ca}^2}{2 R_L}$$

$$-15V - V_{R6} - V_{T3sat} - V_{BET6} - V_{R0.39}$$

$$15V + V_{R0.39} + V_{BET7} + V_{T5sat} + V_{R10}$$

$$V_{R10} = 0.6V \quad V_{R6} = 0.05V$$

$$V_{BET6} = V_{BET7} = 2.5V$$

$$V_{T3sat} = V_{T5sat} = 0.3V$$

$$\hat{V}_{ca1} + V_{R0.39} = 12,15V = 1,1 \cdot \hat{V}_{ca1}$$

$$\hat{V}_{ca1} = 11,04V$$

$$\hat{V}_{ca2} + V_{R0.39} = -11,6V = 1,1 \cdot \hat{V}_{ca2}$$

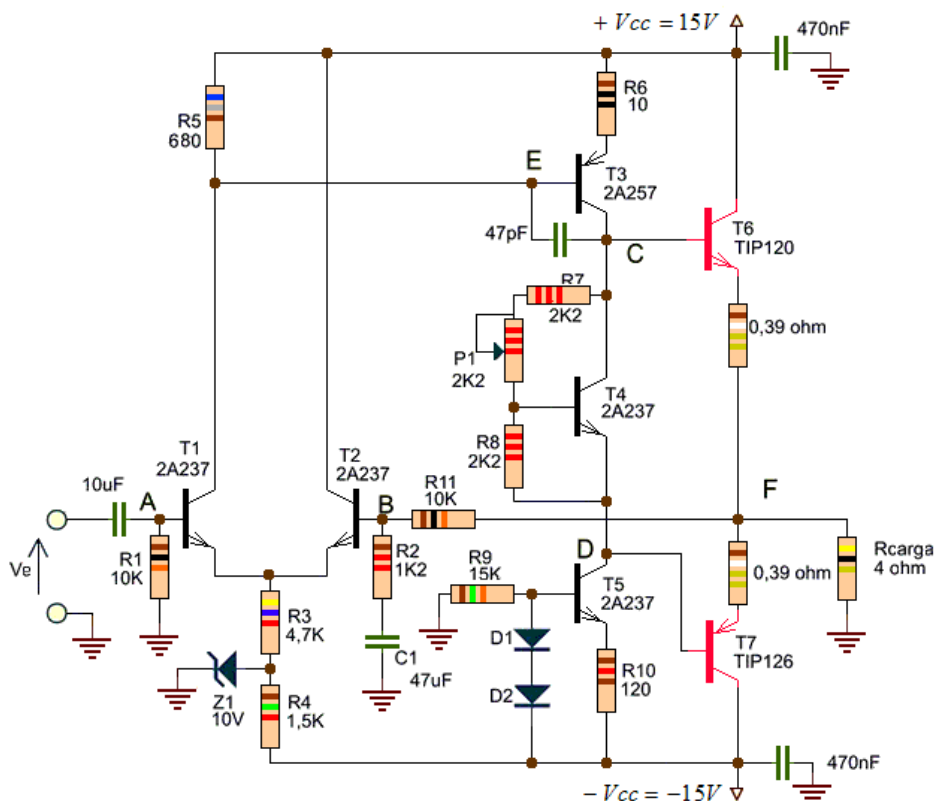
$$\hat{V}_{ca2} = -10,54V$$

$$\overline{P_S} = \overline{V_{ef}} \cdot \overline{I_{ef}} = \frac{\hat{V}_{ca}^2}{2 R_L}$$

$$\overline{P_S} = 13,88W$$

9

e) 2 - Calcular la máxima potencia disipada por los transistores de salida.



Fac. Ingeniería UNLP

$$\text{Definimos a } R'_L = R_L + 0,39\Omega$$

La potencia entregada a esta es:

$$P'_S = \frac{\hat{V}'_{ca}^2}{2 R'_L}$$

La potencia tomada de la fuente es:

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{CC} = V_{CC} \frac{2 \hat{V}'_{ca}}{\pi R'_L}$$

potencia disipada por los transistores es:

$$P_d = P_{CC} - P'_S = \frac{2 V_{CC} \hat{V}'_{ca}}{\pi R'_L} - \frac{\hat{V}'_{ca}^2}{2 R'_L}$$

Como buscamos la máxima potencia disipada por los transistores, hacemos:

$$\frac{\partial P_d}{\partial \hat{V}'_{ca}} = \frac{2 V_{CC}}{\pi R'_L} - \frac{\hat{V}'_{ca}}{R'_L} = 0$$

10

La tensión pico para la máxima potencia disipada por los transistores es:

$$\Rightarrow \hat{V}'_{ca_{P_{Dmáx}}} = \frac{2 V_{cc}}{\pi}$$

La máxima potencia disipada por los transistores es:

$$P_{Dmáx} = \frac{2 V_{cc}}{\pi} \frac{2 V_{cc}}{\pi} \frac{1}{R'_L} = \frac{4 V_{cc}^2}{2\pi^2 R'_L}$$

$$\Rightarrow P_{Dmáx} = \frac{2 V_{cc}^2}{\pi^2 R'_L}$$

$$P_{Dmáx} = 10,4W$$

Cálculo del mínimo rendimiento de la etapa.

Para ese punto de funcionamiento:

$$P_{cc} = V_{cc} \cdot I_{cc} = V_{cc} \frac{4 V_{cc}}{\pi^2 R'_L} = 20,77W$$

La potencia sobre la carga será:

$$P_s = V_{ef} \cdot I_{ef} = \frac{\hat{V}_{ca}^2}{2 R_L}$$

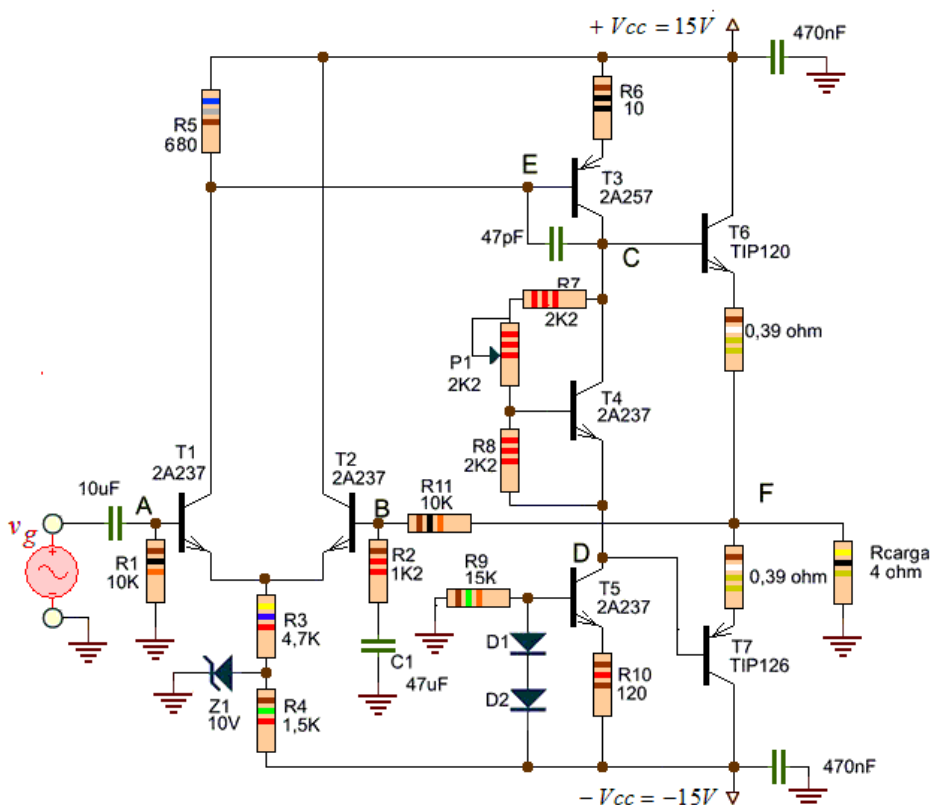
$$P_s = \left(\frac{2 \cdot V_{cc}}{(1,1) \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 R_L} = 9,42W$$

$$\eta\% = \frac{9,42}{20,77} \cdot 100 = 45\%$$

11

Fac. Ingeniería UNLP

e) 3 - Calcular el pico de tensión de la señal de entrada, para obtener la máxima potencia de salida.



$$\hat{V}_e = \frac{\hat{V}_{ca}}{A_v}$$

$$= \frac{(R_{11} + R_2)}{R_2} = \frac{(10 K\Omega + 1,2 K\Omega)}{1,2 K\Omega} \Rightarrow$$

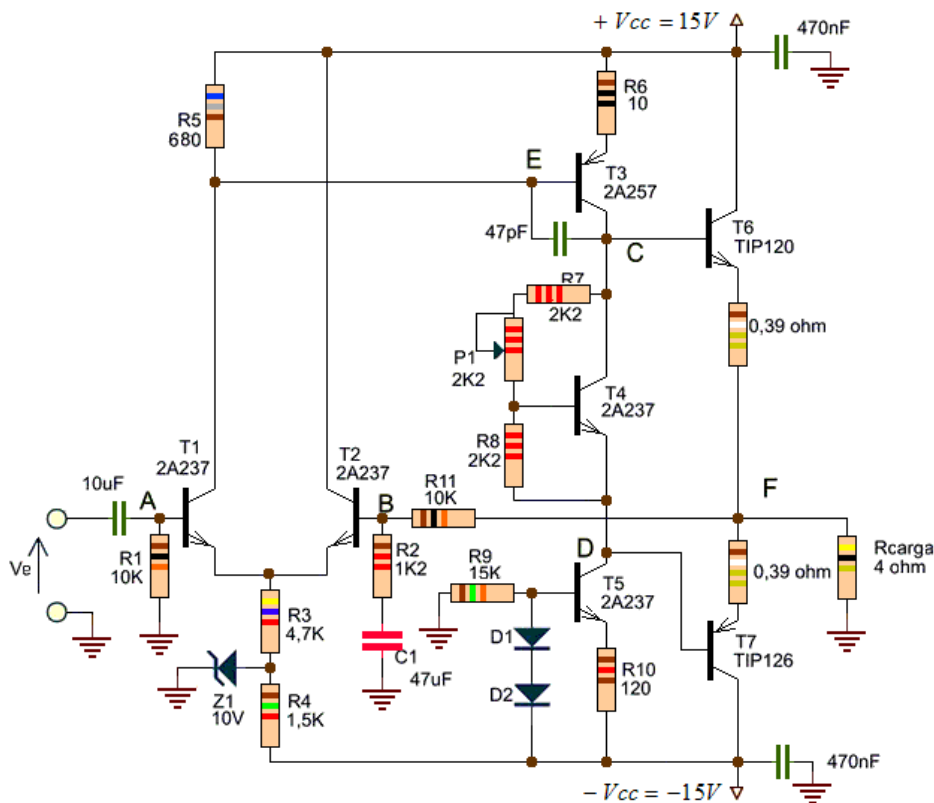
$$\hat{V}_e = \frac{10,54}{9,33} V = 1,13V$$

$$\Rightarrow \hat{V}_e = 1,13V$$

12

Fac. Ingeniería UNLP

f) *Determinar el valor de capacidad necesaria para tener una frecuencia cuadrantal inferior de 10 Hz.*



$$A_v = 1 + \frac{R_{11}}{R_2} \Rightarrow A_v(s) = 1 + \frac{X_{11}}{X_2}$$

$$A_v(s) = 1 + \frac{R_{11}}{R_2 + \frac{1}{sC_1}} = 1 + \frac{sC_1 R_{11}}{1 + sR_2 C_1}$$

$$= \frac{1 + sC_1 R_{11} + sC_1 R_2}{1 + sC_1 R_2} = \frac{1 + sC_1 (R_{11} + R_2)}{1 + sC_1 R_2}$$

$$p_{A_v} = -\frac{1}{R_2 C_1}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 1200}(F)$$

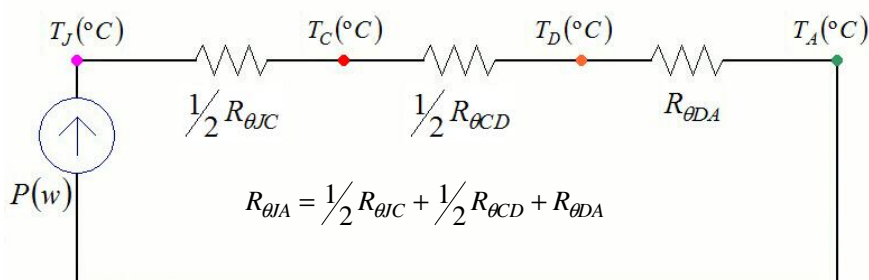
$$C_1 = 13.3 \mu F$$

$$C_1 = 22\mu F$$

Fac. Ingeniería UNLP

13

c) Calcular el θ disipador-ambiente necesario para que el circuito trabaje a una temperatura ambiente de 35°C .



*Debido a que son dos
transistores usamos*

$$\frac{1}{2}R_{\theta JC} \quad y \quad \frac{1}{2}R_{\theta CD}$$

$$R_{\theta RC}=1.92(^{\circ}C/W) \quad R_{\theta CD}=0.7(^{\circ}C/W) \quad T_A=35^{\circ}C \quad T_{Jmax}(^{\circ}C)=150^{\circ}C \quad P_{Dmax}=10.4W$$

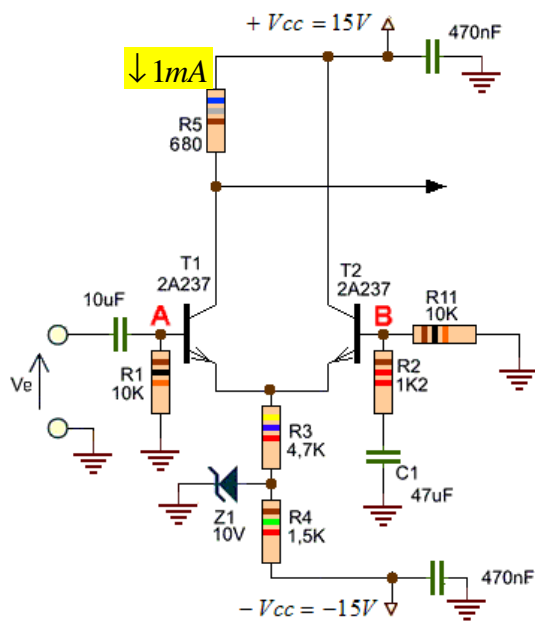
$$R_{\theta 1-2} (^{\circ}C/W) = \frac{T_1(^{\circ}C) - T_2(^{\circ}C)}{P_{Disinar}(W)} \Rightarrow R_{\theta JA} (^{\circ}C/W) = \frac{150(^{\circ}C) - 35(^{\circ}C)}{10.4(W)} \Rightarrow R_{\theta JA} (^{\circ}C/W) = 11,06 (^{\circ}C/W)$$

$$R_{\theta DA} = R_{\theta JA} - \frac{1}{\gamma}(R_{\theta CD} + R_{\theta JC}) \quad \Rightarrow \quad R_{\theta DA} = 9,75 \left(^\circ C \over W \right)$$

Fac. Ingeniería UNLP

14

Calculo de la ganancia de tensión de la primer etapa.



$$G_1(s) = \frac{a_1}{\left(1 + \frac{s}{p_1}\right)}$$

$$a_1 = -g_{m1}R_5 \quad g_{m1} = \frac{I_C}{V_T}$$

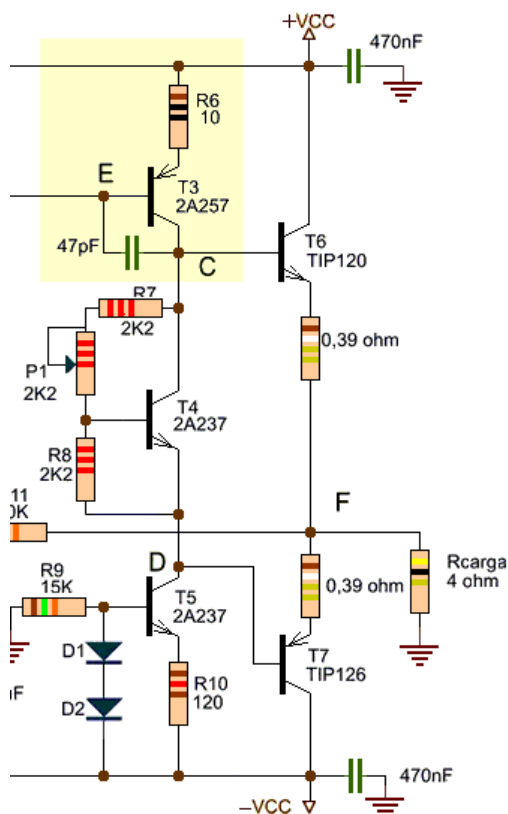
$$I_{T1} = 1\text{mA} \Rightarrow g_{m1} \cong 0.04\text{s}$$

$$a_1 = -0.04\text{s} \cdot 680\Omega$$

$$a_1 = -27.2$$

15

Calculo de la ganancia de tensión de la segunda etapa.



$$G_2(s) = \frac{a_2}{\left(1 + \frac{s}{p_2}\right)}$$

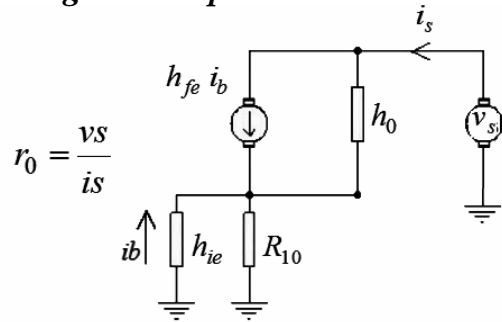
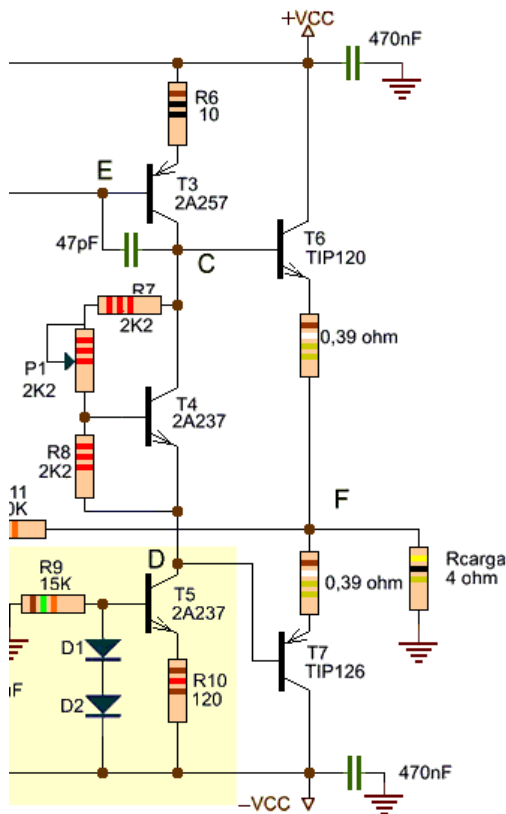
$$a_2 = -\frac{R_{colectorT3}}{R_{emisorT3}}$$

$$R_{colectorT3} = r_d \text{ de colector}$$

$$r_{dT3} = r_{dT4} + r_{dT5} // r_{dref}$$

16

Calculo de la ganancia de tensión de la segunda etapa.



$$g_{m5} = \frac{I_C}{V_T} \quad h_{ie} \cong \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{300}{0.2} = 1500\Omega \quad (R_{10} // h_{ie}) \cong R_{10}$$

$$v_s = (i_s - h_{fe} \cdot i_b) \frac{1}{h_o} + i_s (R_{10} // h_{ie}) = i_s \left[\frac{1}{h_o} + (R_{10} // h_{ie}) \right] - i_b \frac{h_{fe}}{h_o}$$

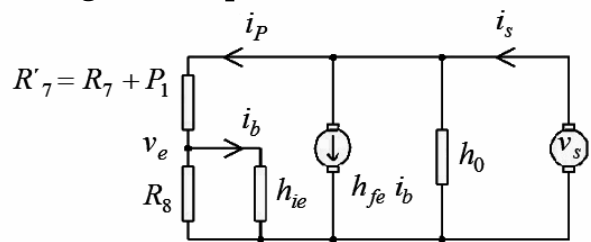
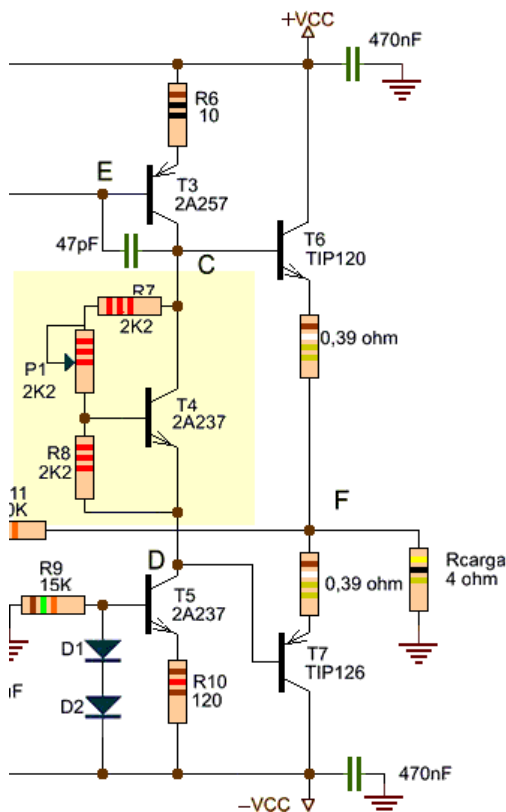
$$i_b = -i_s \frac{R_{10}}{h_{ie}} \Rightarrow v_s = i_s \left(R_{10} + \frac{1}{h_o} + \frac{R_{10} h_{fe}}{h_{ie} h_o} \right)$$

$$r_{dT5} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{1}{h_o} (1 + R_{10} \cdot g_m) \Rightarrow r_{dT5} \cong 5M\Omega$$

17

Fac. Ingeniería UNLP

Calculo de la ganancia de tensión de la segunda etapa.



$$r_{dT4} = \frac{v_s}{i_s} \quad \text{si: } i_{R8} \ll h_{fe} i_b \Rightarrow i_s \cong h_{fe} i_b$$

$$i_b = \frac{v_e}{h_{ie}} \quad \text{y} \quad v_e = \left[\frac{v_s}{(R_8 // h_{ie}) + R'_7} \right] (R_8 // h_{ie})$$

$$\Rightarrow i_s \cong h_{fe} \frac{v_e}{h_{ie}} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \left[\frac{v_s}{(R_8 // h_{ie}) + R'_7} \right] (R_8 // h_{ie})$$

$$\Rightarrow r_{dT4} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{h_{ie}}{h_{fe}} \left[\frac{(R_8 // h_{ie}) + R'_7}{(R_8 // h_{ie})} \right]$$

$$r_{dT4} = \frac{1}{g_m} \left[\frac{(2200 // 1500) + 4400}{(2200 // 1500)} \right]$$

$$r_{dT4} = \frac{6}{0.2} \Omega \Rightarrow r_{dT4} = 30\Omega$$

18

Fac. Ingeniería UNLP

Calculo de la ganancia de tensión de la segunda etapa.

$$G_2(s) = \frac{a_2}{\left(1 + \frac{s}{p_2}\right)} \quad a_2 = -\frac{R_{colectorT3}}{R_{emisorT3}} \quad R_{colectorT3} = r_d \text{ de colector}$$

$$r_{dT3} = r_{dT4} + r_{dT5} // r_{dref} = 30\Omega + 5M\Omega // 4K\Omega \cong 4K\Omega$$

$$a_2 = -\frac{4000}{10} = -400$$

Calculo de la ganancia de tensión de la tercera etapa.

$$G_3(s) = \frac{a_3}{\left(1 + \frac{s}{p_3}\right)} \Rightarrow G_3(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{p_3}\right)}$$

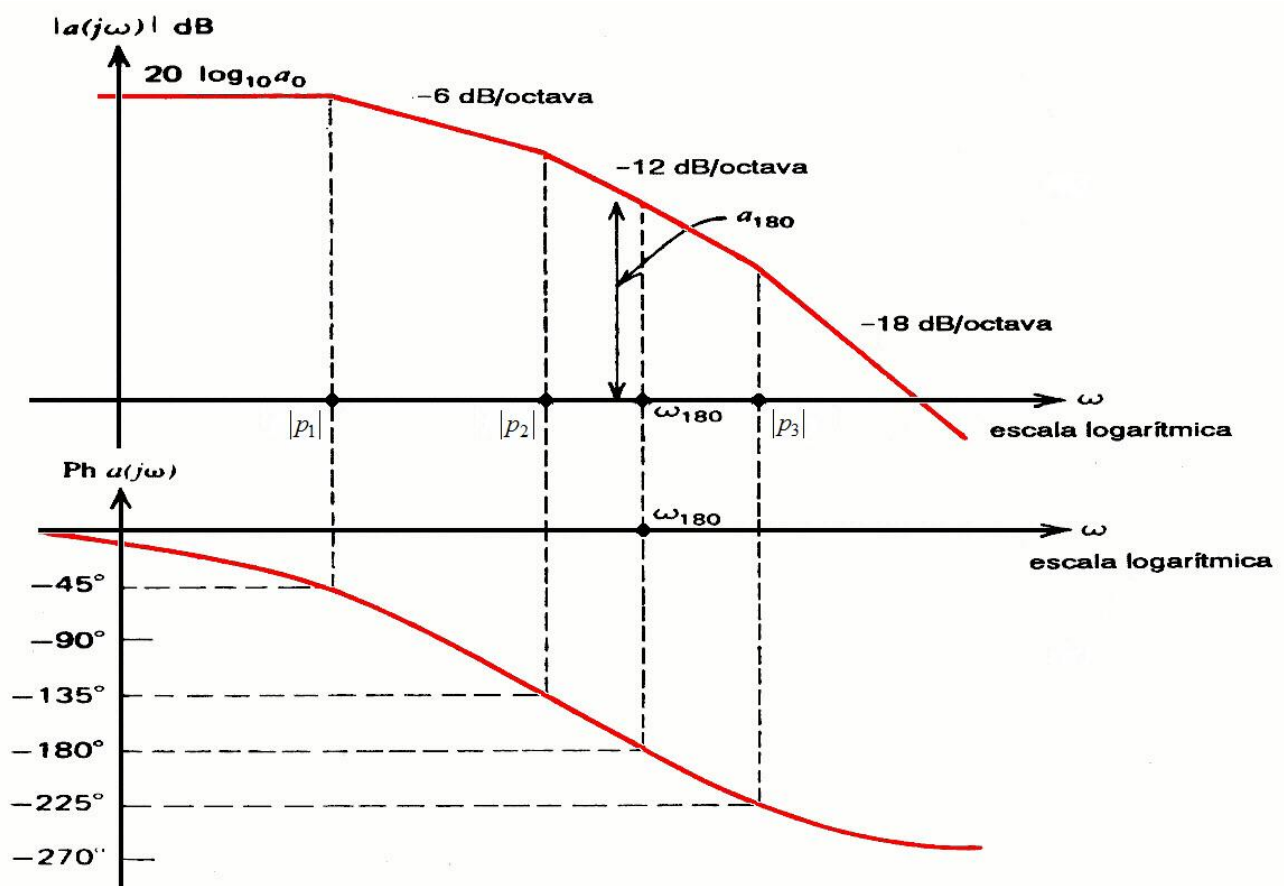
Calculo de la ganancia de tensión total a lazo abierto.

$$G(s) = \frac{-27.2}{\left(1 + \frac{s}{p_1}\right)} \cdot \frac{-400}{\left(1 + \frac{s}{p_2}\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{p_3}\right)}$$

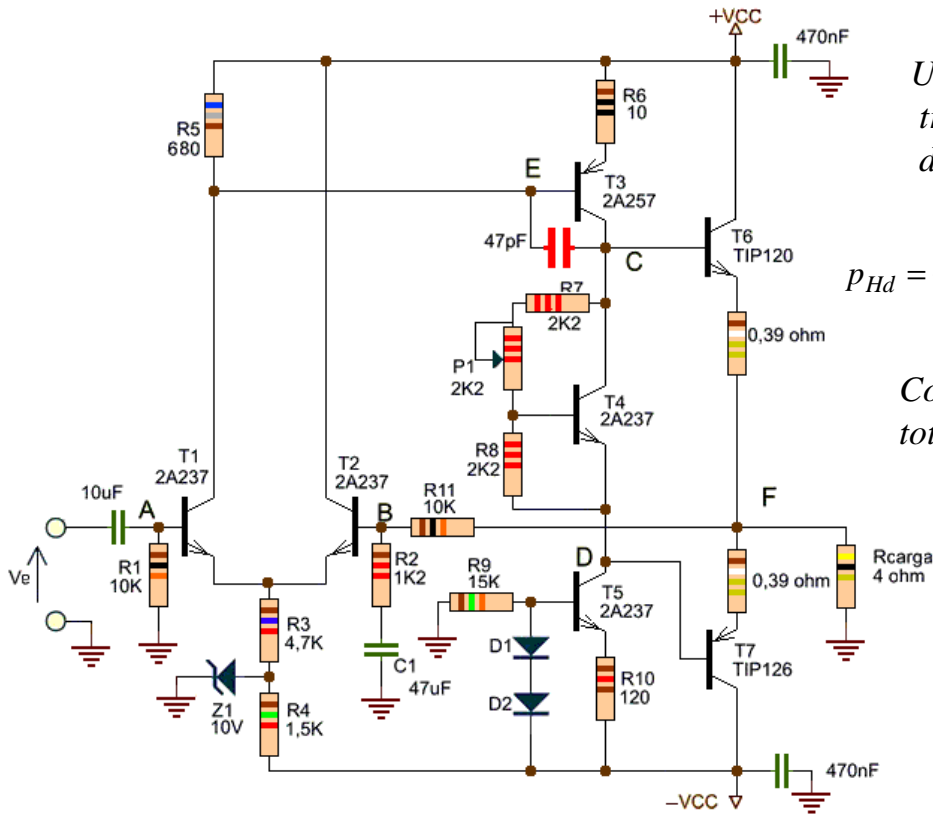
$$G(s) = \frac{10880}{\left(1 + \frac{s}{p_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p_2}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{p_3}\right)}$$

19

Fac. Ingeniería UNLP

Ganancia y fase para un amplificador de 3 polos.

Fac. Ingeniería UNLP

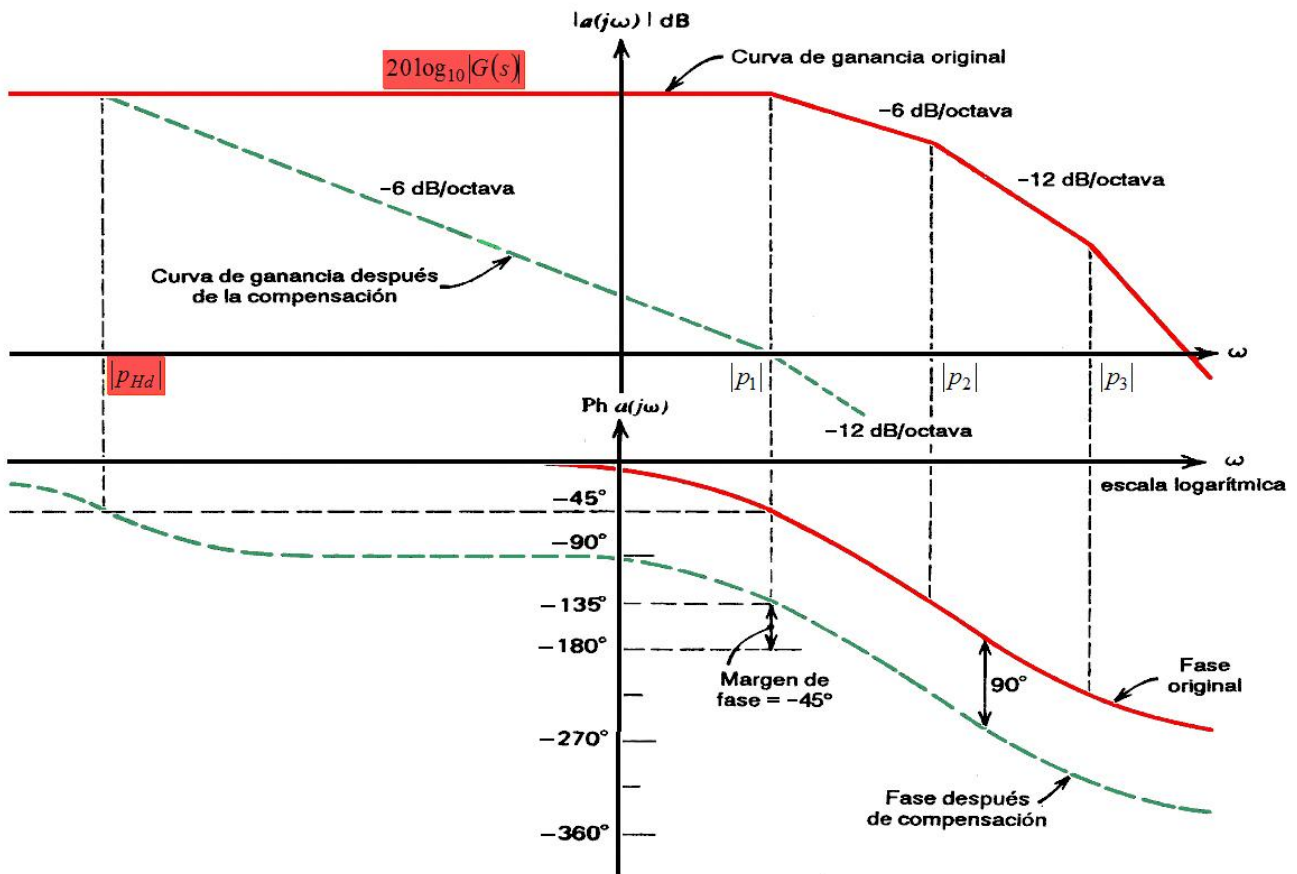
Polo dominante

Utilizando el efecto Miller en el transistor T3, ubicamos un polo dominante en alta frecuencia:

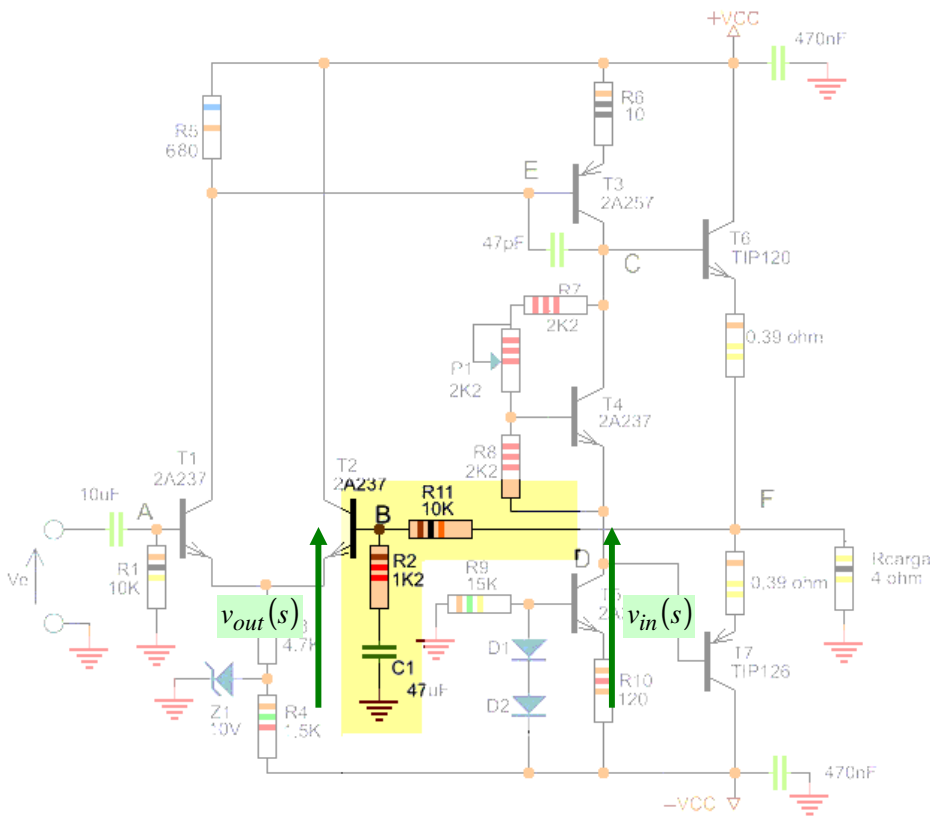
$$p_{Hd} = -\frac{1}{R_{tot}} \cdot \frac{1}{C_{\pi} + (C_{\mu} + 47 \text{ pf})(1 + g_m R_L)}$$

Con lo que la ganancia de tensión total a lazo abierto queda:

$$G(s) = \frac{10880}{\left(1 + \frac{s}{p_{H \text{ DOMINANTE}}}\right)}$$

Ganancia y fase para un amplificador de 3 polos compensado.

Calculo de $H(s)$ $H(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)}$



$$H(s) = \frac{R_2 + \frac{1}{sC_1}}{R_{11} + R_2 + \frac{1}{sC_1}}$$

$$H(s) = \frac{sC_1R_2 + 1}{(R_{11} + R_2)sC_1 + 1}$$

$$H(s) = \frac{\frac{R_2}{(R_{11} + R_2)} \left(s + \frac{1}{R_2C_1} \right)}{\left(s + \frac{1}{(R_{11} + R_2)C_1} \right)}$$

Como... $C_1 = 22 \mu F$

$$z_L = -\frac{1}{R_2C} = 37 \Rightarrow 6Hz$$

$$p_L = -\frac{1}{(R_{11} + R_2)C} = 4 \Rightarrow 0.63Hz$$

Calculo de la ganancia de tensión del amplificador.

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)}$$

$$T(s) = \frac{a_{Total} \left(\frac{1}{1 + s/p_{Hd}} \right)}{1 + a_{Total} \left(\frac{1}{1 + s/p_{Hd}} \right) \cdot \left(\frac{1 + s/z_L}{1 + s/p_L} \right)} = \frac{a_{Tot} \left(1 + s/p_L \right)}{\left(1 + s/p_{Hd} \right) \left(1 + s/p_L \right) + a_{Tot} \left(1 + s/z_L \right)}$$

$$T(s) = \frac{a_{Tot} \left(1 + s/p_L \right)}{\left(1 + s/p_{Hd} \right) \left(1 + s/p_L \right) + a_{Tot} \left(1 + s/z_L \right)} = \frac{a_{Tot} \left(1 + s/p_L \right)}{s^2 \left(\frac{1}{p_{Hd} \cdot p_L} \right) + s \left(\frac{a_{Tot}}{z_L} + \frac{1}{p_L} + \frac{1}{p_{Hd}} \right) + (a_{Tot} + 1)}$$

Despreciando los términos que suman en los paréntesis frente a a_{tot} , multiplicando por $p_L \cdot p_{Hd}$ y calculando luego las raíces

$$T(s) = \frac{(a_{Tot} \cdot p_L \cdot p_{Hd}) \left(1 + s/p_L \right)}{s^2 + s \left(\frac{a_{Tot} \cdot p_{Hd} \cdot p_L}{z_L} \right) + (a_{Tot} \cdot p_L \cdot p_{Hd})} = \frac{(a_{Tot} \cdot p_L \cdot p_{Hd}) \left(1 + s/p_L \right)}{\left(s + \frac{a_{Tot} \cdot p_{Hd} \cdot p_L}{z_L} \right) + (s + z_L)}$$

Calculo de la ganancia de tensión del amplificador.

Acomodando la ecuación
para interpretarla a
frecuencias muy bajas

$$T(s) = \frac{\left(1 + s/p_L\right)}{\left(1 + s/z_L\right)\left(1 + s/(p_{Hd} \cdot p_L \cdot a_{Total}) \div z_L\right)}$$

Acomodando la ecuación
para interpretarla a
frecuencias medias

$$T(s) = \frac{\frac{z_L}{p_L}(s + p_L)}{(s + z_L)\left(1 + s/(p_{Hd} \cdot p_L \cdot a_{Total}) \div z_L\right)}$$

La ganancia de tensión
a frecuencias medias es:

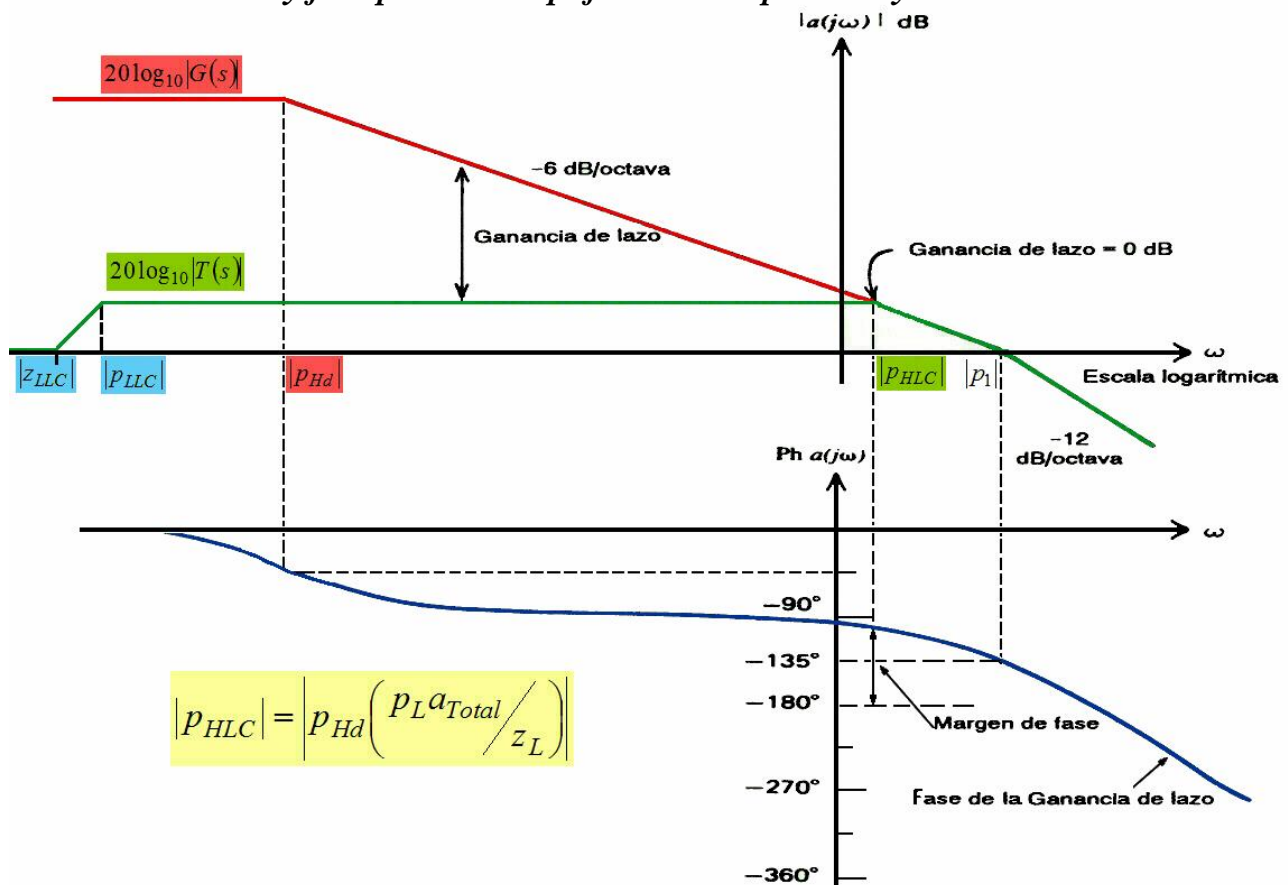
$$A_V = \frac{z_L}{p_L} \frac{-\frac{1}{R_2 C}}{-\frac{1}{(R_{11} + R_2)C}} = \frac{(R_{11} + R_2)}{R_2} \Rightarrow$$

$$A_V = \frac{(R_{11} + R_2)}{R_2} = \frac{(10 \text{ K}\Omega + 1,2 \text{ K}\Omega)}{1,2 \text{ K}\Omega} \Rightarrow$$

$$A_V = 9,33$$

25

Fac. Ingeniería UNLP

Ganancia y fase para un amplificador compensado y realimentado.

Fac. Ingeniería UNLP