

Proyecto amplificador de audio de potencia

Curso: R4051 Viernes Noche

Apellido, Nombre	Legajo
Castagnola, Ramiro	149.494-6
Fernández, Carolina	144.178-4
Mengoni, Tomás	158.956-8
Pérez, Gustavo	120.514-6
Salvia, Nicolás	150.244-0

Fecha de presentación	29/11/2019
Fecha de devolución	
Observaciones	
Firma del profesor	

Cálculos y teoría

Se busca realizar un amplificador con las siguientes especificaciones

- $P = 5W$
- $R_L = 8\Omega$
- $S = 0,4V(RMS)$

Cálculo Vomax

$$V_{o_{ef}} = \frac{V_{o_{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$P_o = \frac{V_{o_{ef}}^2}{R_L} = \frac{V_{o_{max}}^2}{2 * R_L}$$

$$V_{o_{max}} = \sqrt{(2 * P_o * R_L)}$$

$$V_{o_{max}} = \sqrt{(2 * 5 * 8)} = 8.94 V$$

Cálculo Voef máxima

$$V_{o_{ef}} = \frac{V_{o_{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{o_{ef}} = \frac{8.94 V}{\sqrt{2}}$$

Cálculo Iomax

$$I_{o_{max}} = \frac{V_{o_{max}}}{R_L}$$

$$I_{o_{max}} = \frac{8.94 V}{8} = 1.11 A$$

Cálculo de Rp1 y Rp2

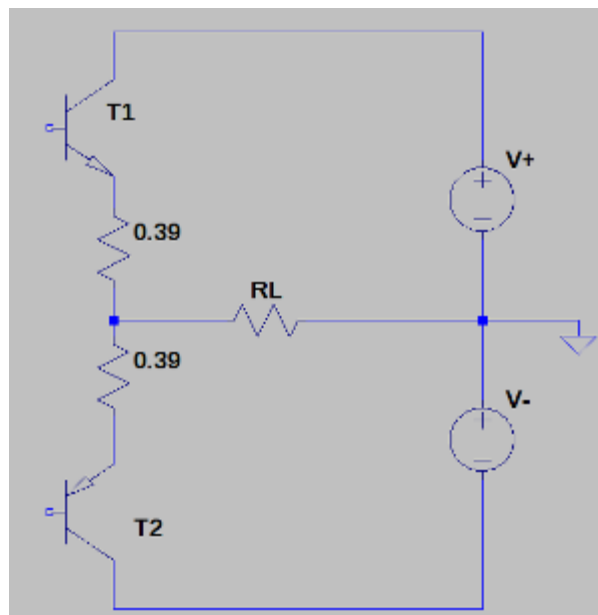
$$0.4 \Omega < R_p < 0.8 \Omega$$

$$R_{p1} = R_{p2} = 0.47 \Omega$$

$$P_{Rp1} = \left(\frac{I_{O_{max}}}{2} \right)^2$$

$$P_{Rp1} = 0.1447 \text{ W}$$

Cálculo de fuente de alimentación



$$V_{+} + V_{-} = V_{cc}$$

$$V_{cc} = V_{cesat1} + I_{O_{max}}(R_L + R_{p1})$$

$$\text{Se adopta } V_{cesat1} = 1 \text{ V}$$

$$V_{+} = 1 \text{ V} + 9.40 \text{ V} = 10.40 \text{ V} \text{ ---> } V_{cc} = 24 \text{ V}$$

Selección de los transistores de salida (par complementario)

Condiciones

$$I_{cmax} > I_{o_{max}}$$

$$BV_{ceo} > \frac{V_{cc}}{0.75}$$

$$p_{dt}(t) = i_c(t) v_{ce}(t)$$

$$P_{DAV} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ce}(t) i_c(t) dt$$

$$P_{DAV} = \frac{1}{2n} \int_0^{2n} v_{ce}(wt) i_c(wt) dw$$

$$i_c(t) = I_{cmax} \sin(wt)$$

$$I_{cmax} \approx I_{omax}$$

$$v_{ce}(t) = v_{ct}(t) - v_{et}(t) = V_{cc} - V_{omax} \sin(wt)$$

$$P_{DAV} = \frac{1}{2n} \int_0^{2n} i_c(wt) v_{ce}(wt) dw$$

$$P_{DAV} = \frac{V_{cc} * V_{omax}}{n * R_L} - \frac{V_{omax}^2}{4 * R_L}$$

$$\frac{dP_{DAV}}{dV_{omax}} = 0$$

$$\frac{V_{cc}}{n * R_L} - \frac{V_{omax}}{2 * R_L} = 0$$

$$V_{omax} = \frac{2 * V_{cc}}{n}$$

$$P_{DAVmax} = \frac{V_{cc}^2}{4n^2 R_L}$$

Considerando un 10% de aumento por falta de regulación en la línea y un 20% de variación en R_L

$$P_{DAVmax} = \frac{(1.1 * V_{cc})^2}{32 * R_L}$$

A partir de las especificaciones tenemos

$$B_{V_{CEO}} \geq \frac{24V}{0.75} = 32V$$

$$P_{DAVmax} = \frac{(1.1V * 24V)^2}{4 * \pi^2 * (0.8 * 8\Omega)} = 2.75W$$

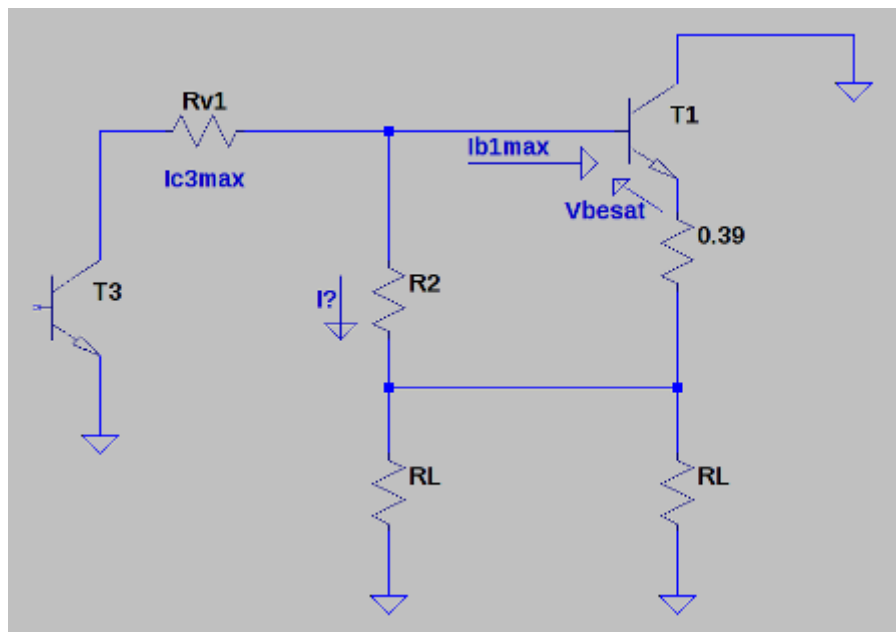
Se adoptan los transistores BD437 y BD438 ya que

1. $B_{V_{CEO}} = 45 \text{ V}$
2. $I_{omax} = 4 \text{ A}$
3. $P_D = 36 \text{ W}$

Cálculo de R1, R2 y Rv1

$$I_{b1max} = \frac{I_{c1max}}{h_{FE1}}$$

$$I_{b1max} = \frac{1.11 \text{ A}}{120} = 9.25 \text{ mA}$$



$$I_{c3max} = I_{b1max} + I?$$

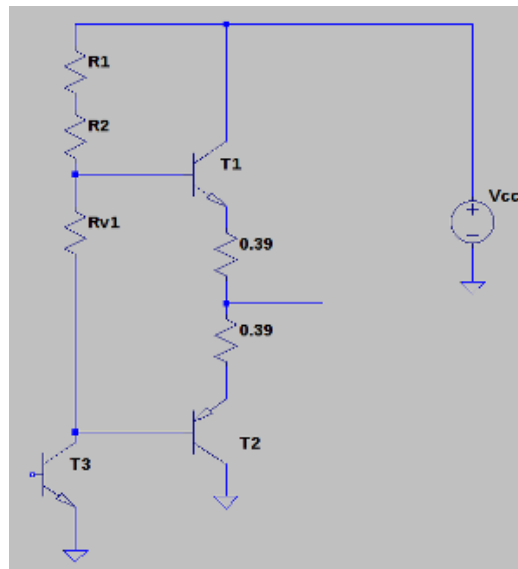
Se asume $I? = 0.1 * I_{b1max}$

$$I_{c3max} = (1 + 0.1) * I_{b1max} * I_{c3} \geq I_{c3max}$$

$$I_{c3} = I_{b1} + 0.1 * I_{b1} = 9.25 \text{ mA} (1 + 0.1) = 10.17 \text{ mA}$$

Se adoptó: $I_{c3} = 12 \text{ mA}$

Se utiliza el siguiente circuito:



$$V_{cc} \approx I_{cq3} * (R_1 + R_2 + R_{v1}) + V_{CEQ3}$$

$$(R_1 + R_2 + R_{v1}) = \frac{V_{cc} - V_{CEQ3}}{I_{CQ3}} = \frac{V_{CC} - (V_{CC}/2)}{I_{CQ3}} = \frac{V_{CC}/2}{I_{CQ3}}$$

$$(R_1 + R_2 + R_{v1}) = \frac{12V}{12mA} = 1k\Omega$$

$$V_{B1-T} - V_{B2-T} = I_{CQ3} * R_{V1}$$

Sabiendo que dicha diferencia de potencial puede oscilar entre 1V y 1.5V. Tomando el rango más alto y despejando Rv1

$$R_{v1} = \frac{1.5V}{I_{CQ3}} = \frac{1.5V}{12mA} = 125\Omega \rightarrow 120\Omega$$

Dado que en el circuito dinámico, R1 se encuentra en paralelo con la carga, R1 debe ser mucho mayor que RL. Por lo tanto, el criterio de diseño que se utiliza es $R_1 \geq 20 * R_L = 20 * 8\Omega = 160\Omega \rightarrow 180\Omega$

La potencia que debe disipar R1 será

$$P_{R1} = I_{CQ3}^2 * 20 * R_L = 23.04mW$$

Entonces, sabiendo los valores de Rv1 y R1 podemos despejar R2 y la potencia que disipa será

$$R_2 = 1\text{ k}\Omega - R_{v1} - R_1 = 720\ \Omega \rightarrow 680\ \Omega$$

$$P_{R2} = I_{CQ3}^2 * R_2 = 103.68\text{ mW}$$

$$I ? = \frac{V_{BE1sat} + I_{e1max} * R_P}{R_2} = \frac{1.2\text{ V} + (1.1\text{ A} * 0.47\ \Omega)}{680\ \Omega} = 2.53\text{ mA}$$

Selección del transistor excitador (T3)

$$I_{c3max} \geq I_{CQ3} + I_{b3max} + I ?$$

$$I_{c3max} \geq 23.78\text{ mA}$$

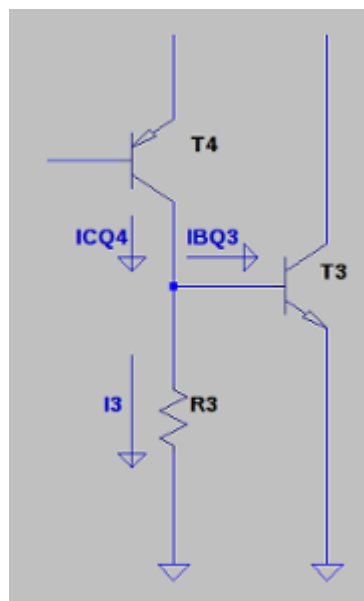
$$BV_{CEO3} \geq \frac{V_{CC}}{0.75} = 32\text{ V}$$

$$P_{Dmax3} \geq I_{CQ3} * V_{CEQ3} = 144\text{ mW}$$

Se adoptó el BC337 ya que

1. $I_{Cmax} = 800\text{ mA}$
2. $BV_{CEO} = 45\text{ V}$
3. $P_{DVmax} = 625\text{ mW}$

Cálculo de R3



$$I_3 = I_{CQ4} - I_{BQ3}$$

Se adopta $I_{CQ4} = 5 * I_{BQ3}$

$$I_3 = 5 * I_{BQ3} - I_{BQ3}$$

$$I_3 = 4 * I_{BQ3}$$

$$I_{BQ3} = \frac{I_{CQ3}}{h_{FE3}} = \frac{12mA}{160} = 75\mu A$$

$$R_3 = \frac{V_{BE3}}{I_3} = \frac{0.7V}{300\mu A} = 2k2\Omega$$

Selección de T4

$$I_{Cq4max} = 750\mu A$$

$$B_{VCE04} = \frac{12V}{0.75} = 16V$$

Se adoptó el BC559B ya que

1. $I_{Cqmax} = 200mA$
2. $B_{VCE0} = 30V$
3. $hfe \approx 300$

Determinación del punto Q de la etapa de entrada

$$\frac{V_{CC}}{2} = V_{ECQ4} + I_{EQ4} * R_4 + I_3 * R_3$$

$$V_{ECQ4} = \frac{V_{CC}}{2} - I_{EQ4} * R_4 - I_3 * R_3$$

Cálculo de R4

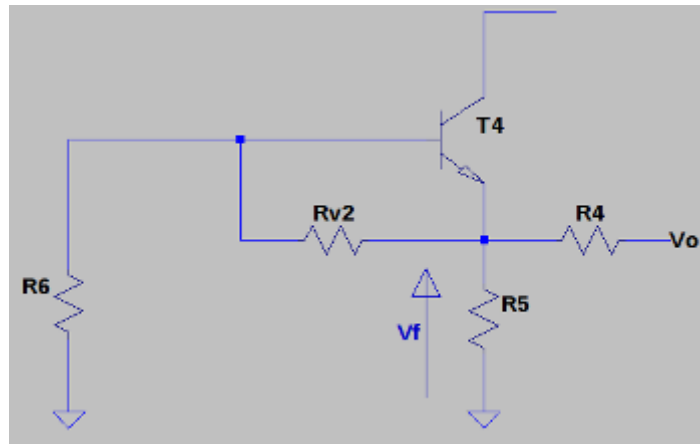
Recordando que $I_{EQ4} \approx I_{CQ4}$

$$R_4 = \frac{V_{R4}}{I_{EQ4}} = \frac{12V * 0.2V}{5 * 75\mu A} = 6400\Omega \rightarrow 6800\Omega$$

Cálculo de R5

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{6.32 V}{400 mV} = 15.8$$

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v}$$



$$\beta = \frac{V_f}{V_o} = \frac{R_5}{R_4 + R_5}$$

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_4}{R_5}$$

$$R_5 = \frac{R_4}{\frac{1}{\beta} - 1} = \frac{6 k 8 \Omega}{15.8 - 1} = 460 \Omega$$

$$r_{i3} = \frac{h_{FE3}}{g_{m3}}$$

$$R_5 < \frac{r_{i3} * R_3}{r_{i3} + R_3}$$

R5 debe ser menor a la condición mencionada para obtener amplificación en la primera etapa y debe ser grande para obtener una Rif elevada, por lo que se asume un valor y se recalcula R4

$$R_4 = \beta * R_5$$

Se adopta un valor de $R_5 = 18 \Omega$, entonces

$$R_4 = R_5 * 14.8 = 266 \Omega \rightarrow 280 \Omega$$

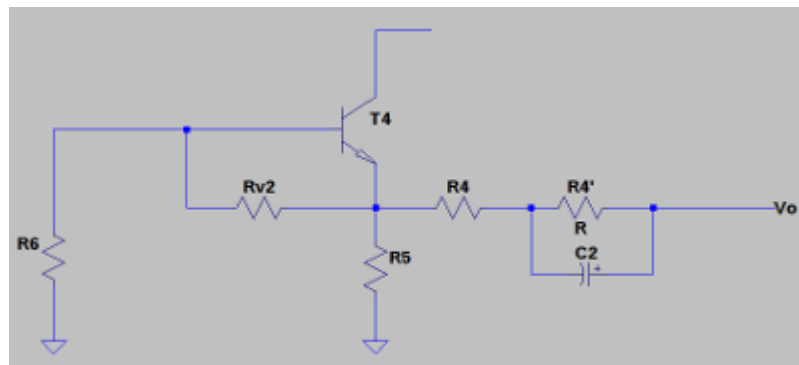
El valor obtenido va a diferir del valor anterior por lo que se divide la resistencia en dos y se calcula la resistencia faltante de la siguiente manera

$$R_{4'} = R_{4ant} - R_4$$

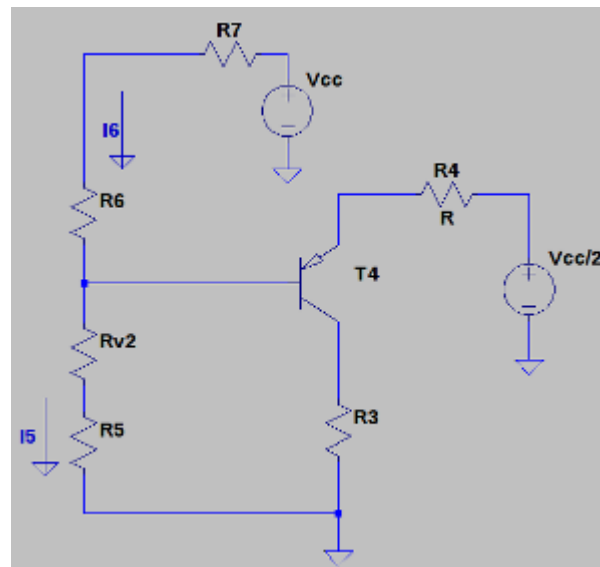
$$R_{4'} = 6\text{ k}\Omega - 270\Omega = 5\text{ k}\Omega$$

Recalculando I_{EQ4}

$$I_{EQ4} = \frac{V_{R4}}{R_{4'} + R_4} = \frac{2.4\text{ V}}{5\text{ k}\Omega + 270\Omega} = 470\mu\text{A}$$



Cálculo de la red de polarización del transistor de entrada



$$I_6 = \frac{I_{CQ4}}{\beta_{FE4}} + I_5$$

I_6 debe ser similar a I_5 para obtener una red de polarización estable e

independiente de I_{BQ4} , entonces

$$I_5 \gg I_{BQ4}$$

$$I_{BQ4} = \frac{I_{CQ4}}{h_{FE4}} = \frac{370 \mu A}{300} = 1.23 \mu A$$

$$I_5 = 30 * I_{BQ4} = 36.9 \mu A$$

$$I_6 = 36.9 \mu A + 1.23 \mu A = 38 \mu A$$

Cuanto mayor sea la desigualdad, más estable será la polarización pero el límite lo impone la resistencia de entrada estipulada para el amplificador.

$$R_{v2} = \frac{V_{B4T}}{I_5} - R_5 = \frac{9V}{36.9 \mu A} - 18 \Omega = 244 k\Omega \rightarrow 220 k\Omega$$

$$V_{B4T} = \frac{V_{Cc}}{2} - I_{EQ4} * R_4 - V_{BE4} = 12V - 2.4V - 0.6V = 9V$$

También se tiene que R_{v2} está en paralelo con h_{ie4} entonces,

$$R_{v2} \gg h_{ie4}$$

Por otro lado,

$$R_{iaf} = R_6 // R_{if}$$

Entonces

$$R_{if} = ((h_{ie4} // R_{v2}) + (R_4 / R_5)(1 + h_{fe4})) * (1 + \beta * A_v)$$

Por otro lado

$$R_6 + R_7 = \frac{V_{cc} - V_{B4T}}{I_6} = \frac{24V - 9V}{38 \mu A} = 395 k\Omega$$

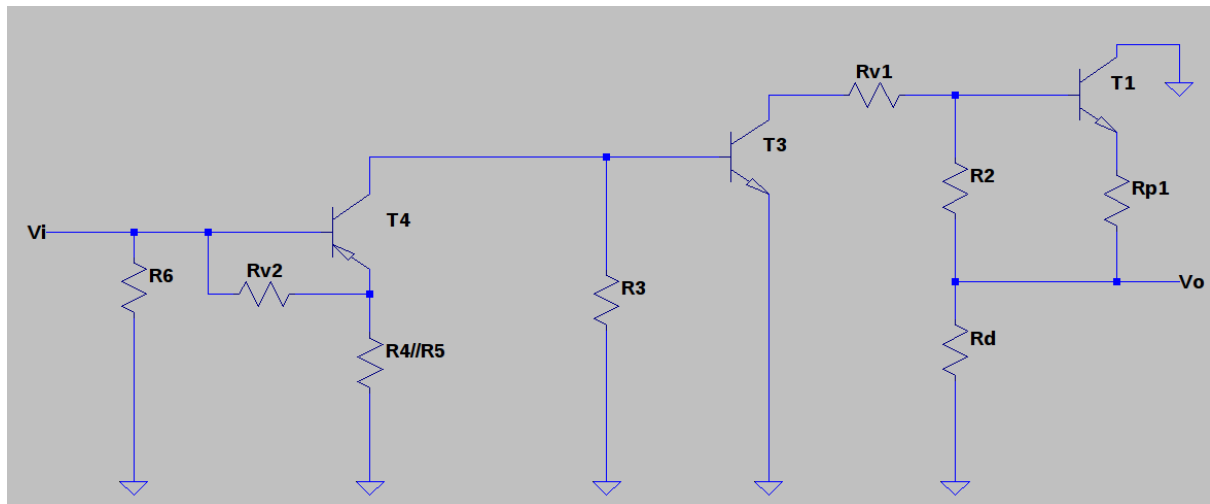
$$R_6 \simeq R_{iaf} \geq 90 k\Omega$$

Entonces, se obtiene $R_6 = 120 k\Omega$ y $R_7 = 270 k\Omega$

Cálculo de la ganancia

$$R_d = (R_4 + R_5) // R_1 // R_L$$

$$R_d = (270 \Omega + 180 \Omega) // 180 \Omega // 8 \Omega$$



$$R_6 = 120 \text{ k}\Omega$$

$$R_{v1} = 120 \Omega$$

$$R_{v2} = 220 \text{ k}\Omega$$

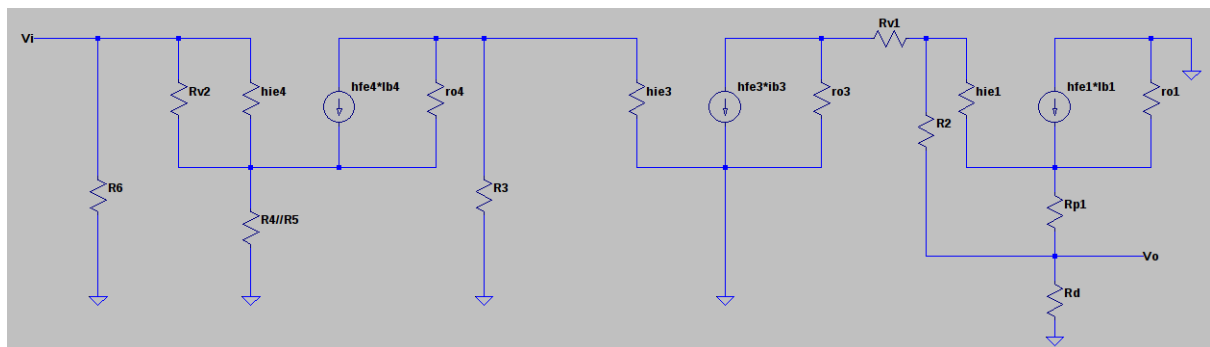
$$R_2 = 680 \Omega$$

$$R_4 // R_5 = 16.8 \Omega$$

$$R_d = 7.5 \Omega$$

$$R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{p1} = 0.47 \Omega$$



$$h_{ie4} = \frac{hfe4}{gm4} = \frac{300}{40 * 370 \mu A} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_{v2} // h_{ie4} = 18 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o4} = r_{o4}$$

$$r_{o4} = \frac{1}{\eta * gm4} = \frac{1}{5 * 10^{-4} * 40 * 475 \mu A} = 135.135 \text{ k}\Omega$$

$$\text{Se asume } R_{Osp} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o4} = 78.876 \text{ k}\Omega$$

$$R_{i4} = (R_{v2} // h_{ie4}) + (R_4 // R_5) * hfe4 = 23.340 \text{ k}\Omega$$

$$r_{o1} = \frac{1}{\eta * gm1} = \frac{1}{2.5 * 10^{-4} * 40 * 1.11 \text{ A}} = 90 \Omega$$

$$r_{o3} = \frac{1}{\eta * g m_3} = \frac{1}{2.5 * 10^{-4} * 40 * 12 mA} = 8k3 \Omega$$

$$h i e_1 = \frac{h f e_1}{g m_1} = \frac{120}{40 * 1.11 A} = 2.7 \Omega$$

$$h i e_3 = \frac{h f e_3}{g m_3} = \frac{160}{40 * 12 mA} = 333 \Omega$$

$$V_{b1} = I ? * 680 \Omega + (I 1 + I ?) * R_L = 2.53 mA * 680 \Omega + (1.11 A + 2.53 mA) * 8 \Omega = 10.62 V$$

$$R_{i1} = \frac{V_{b1}}{I ? + I_{b1}} = \frac{10.62 V}{2.53 mA + 9.25 mA} = 901.5 \Omega$$

$$R_{eq} = \frac{I_1 * R_L + I_{e1} * R_{p1} + I ? * R_{L\Box}}{I_1} = \frac{1.11 A * 8 \Omega + 1.11 A * 0.47 \Omega + 2.53 mA * 8 \Omega}{1.11 A} = 8.48 \Omega$$

Cálculo de capacitores

Cálculo de disipadores

Para el BD437 y BD438 tenemos que

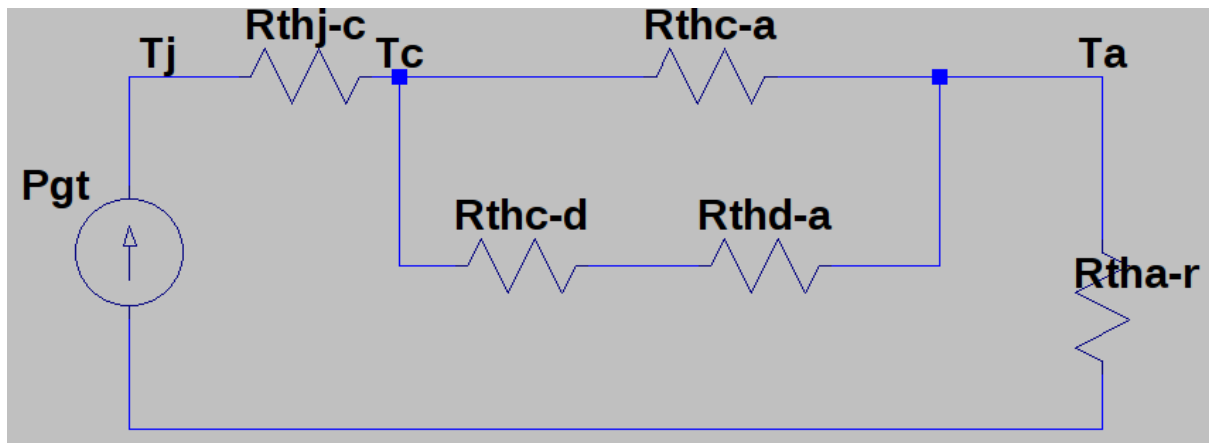
- $T_{JMAX} = 150^{\circ} C$
- $Rt h_{j-a} = 100^{\circ} C / W$
- $Rt h_{j-c} = 3.5^{\circ} C / W_{\Box}$

Según lo calculado previamente, tenemos que disipan una potencia máxima de 2.75W. Entonces, la potencia máxima que puede disipar estará dada por

$$P_{dt} = \frac{T_{jmax} - T_a}{Rt h_{j-a}} = \frac{150^{\circ} C - 25^{\circ} C}{100^{\circ} C / W} = 1.25 W$$

Dado que la potencia máxima que disipa es mayor que la potencia que puede disipar, es necesario usar disipador.

El modelo equivalente utilizado es



Comenzamos calculando la resistencia térmica

$$R_{tht} = \frac{T_j - T_a}{P_i} = \frac{100^\circ C - 25^\circ C}{2.75 W} = 27.27^\circ C/W$$

Despejando obtenemos

$$R_{tht} = R_{thj-c} + [R_{thc-d} / (R_{thc-d} + R_{thd-a})]$$

$$R_{tht} - R_{thj-c} = R_{thc-d} /$$

$$27.27^\circ C/W - 3.5^\circ C/W = 96.5^\circ C/W (R_{thc-d} + R_{thd-a})$$

$$23.77^\circ C/W = 96.5^\circ C/W (R_{thc-d} + R_{thd-a})$$

Despejando obtenemos

$$R_{thc-d} + R_{thd-a} = 31.54^\circ C/W$$

Componentes

Componente	Valor	Potencia	Pot Max	Disipador
R3	2k2Ω	201.51uW	1/4W	-
R4	270Ω	29.96uW	1/4W	-
R4'	6k2Ω	688.04uW	1/4W	-
R5	18Ω	28.56nW	1/4W	-
R6	120kΩ	183.22uW	1/4W	-
R7	270kΩ	412.24uW	1/4W	-
Rp1	0.47Ω	0.1447W	1/4W	-
Rp2	0.47Ω	0.1447W	1/4W	-
Rv1	120Ω	19.62mW	1/4W	-
Rw1	1k2Ω	106.54mW	1/4W	-
Cb1	220uF	-	-	-
Cb2	100uF	-	-	-
Ca	2200uF	-	-	-
C	1uF	-	-	-
Cf1	4.7uF	-	-	-
T1	BD437	2.75W		
T2	BD438	2.75W		
T3	BC337	144.35mW		
T4	BC557B	2.89mW		
T5	BC557B	153.82mW		
T6	BC557B	6.51mW		

