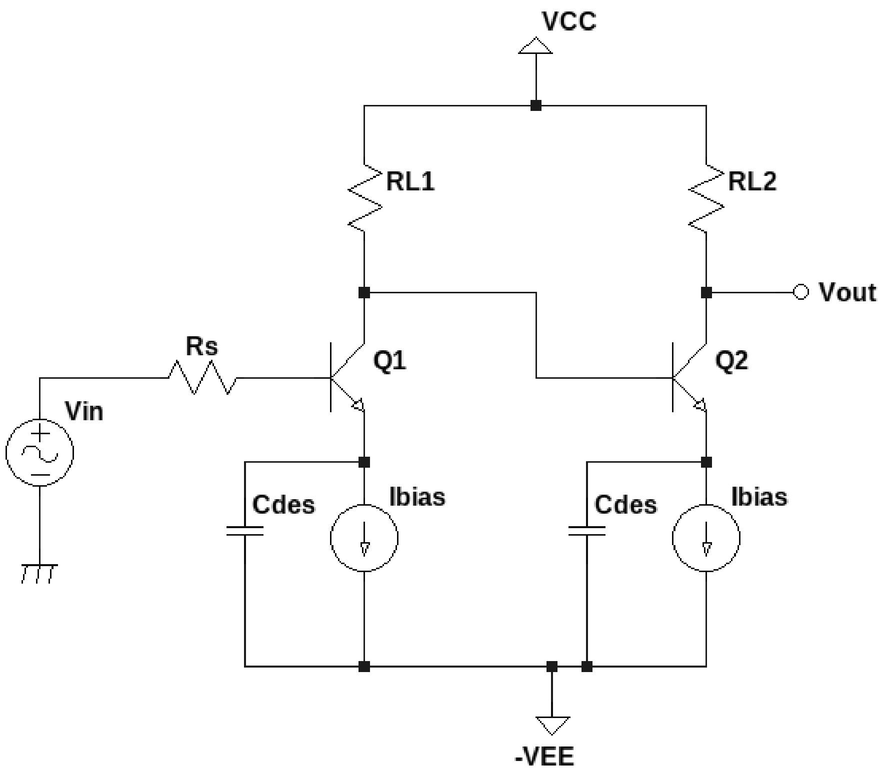
Prueba Final de Electrónica Avanzada 1
27/11/2024

Resolver cada problema en hojas separadas.
Duración de la prueba: 3 horas.
La prueba es **sin** **material** e **individual**.
Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

Problema 1: (27 puntos)

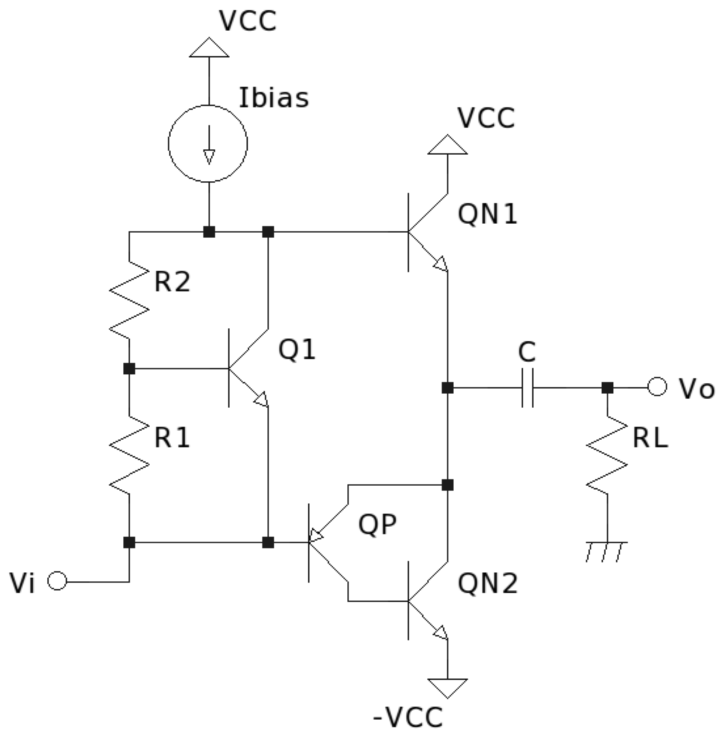
En el amplificador de dos etapas de la figura se debe seleccionar como se repartirá la ganancia entre cada etapa a los efectos de obtener el mayor ancho de banda, manteniendo aproximadamente la ganancia total.
Las posibles opciones son dos:
1) Se conecta la resistencia RLA en la primera etapa (RL1=RLA) y la resistencia RLB en la segunda (RL2=RLB).
2) Se conecta la resistencia RLB en la primera etapa (RL1=RLB) y la resistencia RLA en la segunda (RL2=RLA).
a) Calcular la ganancia vout/vin a frecuencias medias para ambos casos.
b) Determine cual de las dos opciones elegiría para obtener el mayor ancho de banda, justifique claramente.
c) Calcular la frecuencia de caída de -3dB para el caso elegido.
Datos:
Q1 y Q2 : C_μ = 10 pF, Cje = 60 pF, f_T = 200 MHz@I_C = 5mA, β = 400.
Rs = 4 kΩ, RLA = 150 Ω, RLB = 300 Ω, Ibias = 2mA, VCC = - (VEE) son tales que todos los transistores funcionan en zona activa. Los condensadores Cdes se podrán considerar infinitos.



Problema 2: (27 puntos)

a) Dimensione VCC e Ibias que aseguren poder suministrar 9 W de potencia a la carga sin presentar distorsión en la salida. Puede utilizar las aproximaciones usuales vistas en el curso, incluyendo que la señal de entrada es una sinusoide.
b) Para el VCC mínimo hallado en a), determine la eficiencia de la etapa de salida cuando se suministran 9 W a la carga.
c) Determine la máxima potencia que debe disipar todo el circuito para cualquier potencia entregada entre 0 W y 9 W.
d) Para los transistores de potencia del circuito se cuenta sólo con transistores tipo NPN, por lo que en el lado inferior de la etapa se utiliza un transistor tipo PNP "estándar" en combinación con un transistor de potencia tipo NPN como se muestra en la figura. Determine la máxima temperatura ambiente a la que puede funcionar el circuito.
e) Ahora a los transistores de potencia NPN (QN1, QN2) se les coloca a cada uno un disipador de 6 cm^2 con una resistencia térmica en función del area de $\theta_{SA} = 100$ °C.cm^2/W. La resistencia térmica $\theta cs = 0.5$°C/W.
El encapsulado del transistor QP no puede acoplarse a un disipador. ¿A que temperatura ambiente máxima puede trabajar ahora el circuito?

Datos:
RL = 8 Ω, R1 = R2 = 1.2 kΩ,
Q1: VBE = 0.6 V si Ic > 0.5 mA; $\beta >> 1$
QP: VEB = 0.6 V, $\beta >> 1$, Tjmáx = 125 °C; $\theta jc = 10$ °C/W; $\theta ca = 150$ °C/W
QN1, QN2: VBE = 0.75 V; $\beta = 20$; Tjmáx = 160 °C; $\theta jc = 2$ °C/W; $\theta ca = 70$ °C/W



Problema 3: (27 puntos)

a) El circuito de la Figura 1 tiene M transistores conectados en paralelo en la rama derecha y N transistores conectados en paralelo en la rama izquierda. Determine la relación entre I1 e I2.
b) En el circuito de la Figura 2 determine la relación entre I1 e I2.
c) Con los circuitos de las Figuras 1 y 2 se plantea el circuito de la Figura 3. Determine la corriente por la resistencia RL en función de M, N, y R.
d) ¿Qué condición deben cumplir M y N para que la corriente por RL no sea nula?
e) ¿Cómo depende la corriente por RL de la temperatura?

En todo el problema se podrá asumir que:

- β es suficientemente grande como para poder despreciar las corrientes de base,
- todos los transistores operan en zona activa,
- todos los transistores PNP idénticos entre sí,
- todos los transistores NPN idénticos entre sí,
- todos parámetros de los transistores iguales: VEB =VBE, VCEsat = VCEsat, β, etc.

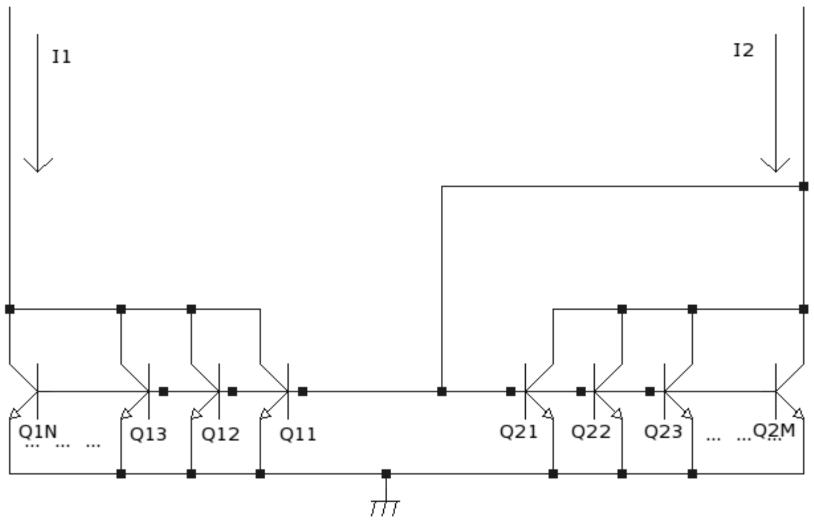


Figura 1

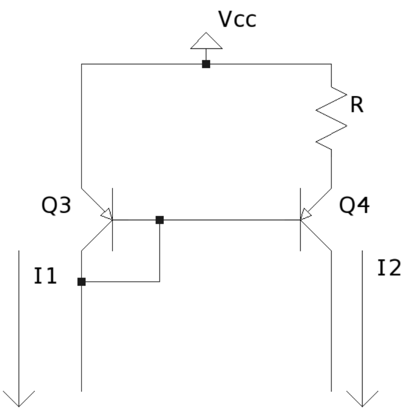


Figura 2

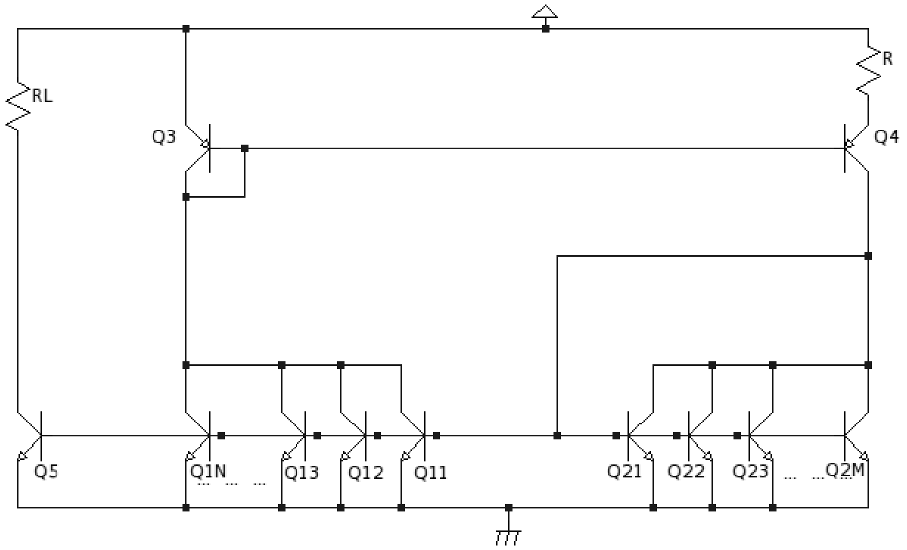


Figura 3

Pregunta : (19 puntos)

Se busca ver cómo varían varios parámetros de dos amplificadores diferenciales los cuales sólo se diferencian en cuanto a configuración de resistencias de emisor y fuentes de corriente.
Para esto, calcule para los amplificadores diferenciales de las Figuras 1 y 2:

a) Resistencia de entrada diferencial y ganancia diferencial (vo2−vo1)/(v1−v2).
Para esta parte considere las fuentes de corrientes ideales.

b) Resistencia de entrada en modo común y la ganancia en modo común considerando la salida Vo1.
Para esta parte considere que las fuentes de corriente Io tienen una resistencia de salida finita de valor ro y que la fuente de corriente de la Figura 1 es equivalente a dos fuentes Io en paralelo.

c) Rango de entrada en modo común, teniendo en cuenta que se requiere un voltaje mínimo V_{min_Io} en bornes de las fuentes de corriente para que funcionen correctamente.

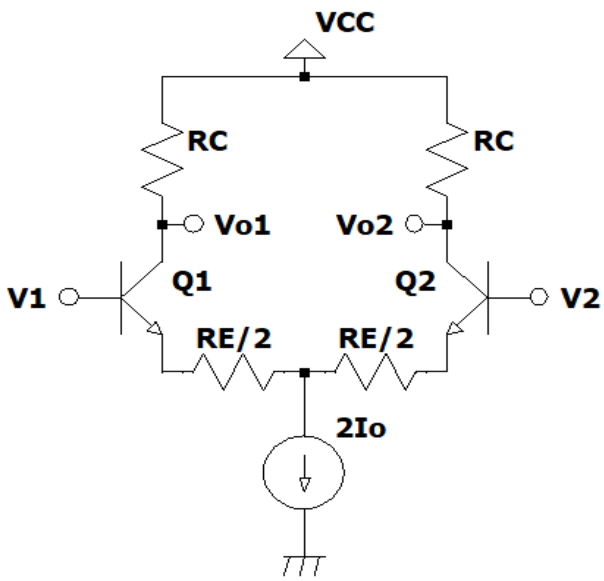


Figura 1

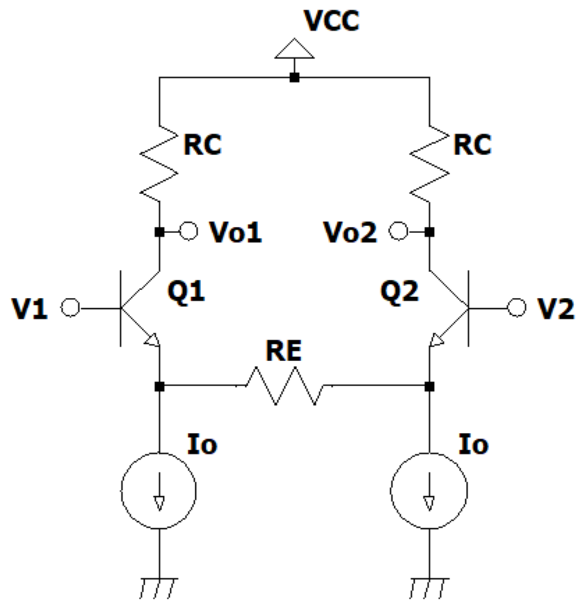
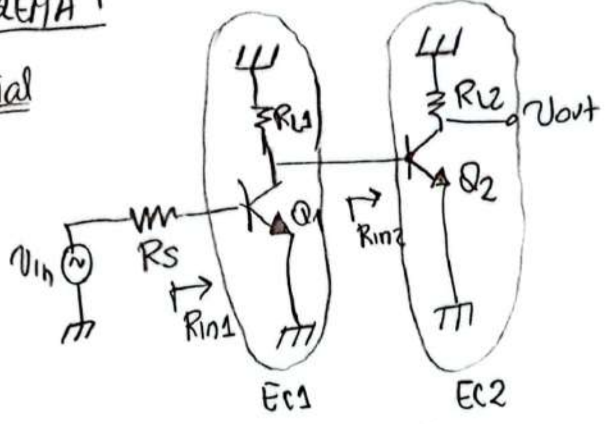


Figura 2

ELECTRÓNICA AVANZADA 1 - PARCIAL 2024

PROBLEMA 1

a) en señal



Dos emisores comunes

DC

$I_{C1} = I_{C2} = I_{BIAS}$

$g_{m1} = g_{m2} = g_m = \frac{I_{BIAS}}{V_T} = \frac{2mA}{26mV} = 77mS$

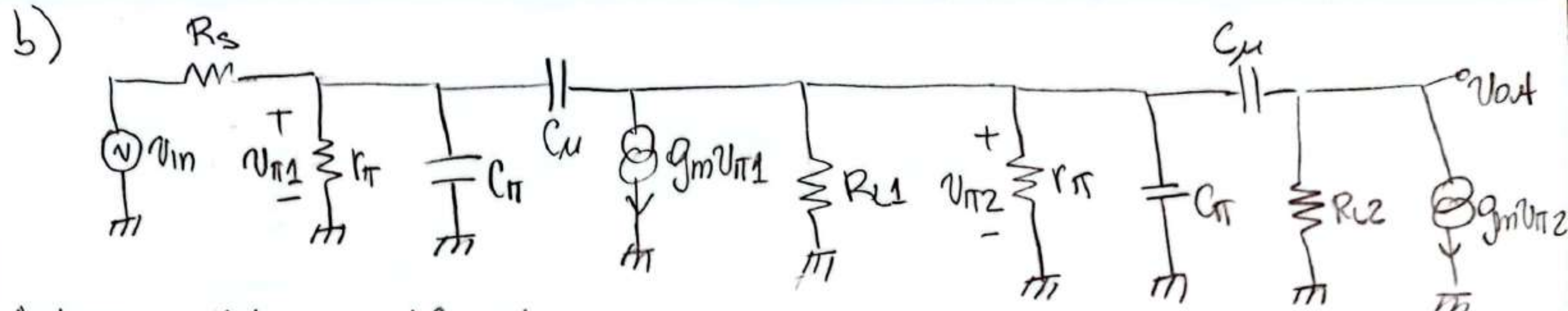
$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{400}{77mS} = 5,2 K\Omega$

Ganancia en frecuencias medias

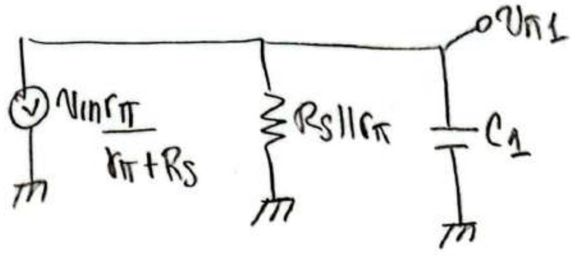
$$G = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \underbrace{\frac{V_{out}}{V_{BQ2}}}_{G_2} \underbrace{\frac{V_{BQ2}}{V_{BQ1}}}_{G_1} \frac{V_{BQ1}}{V_{in}}$$

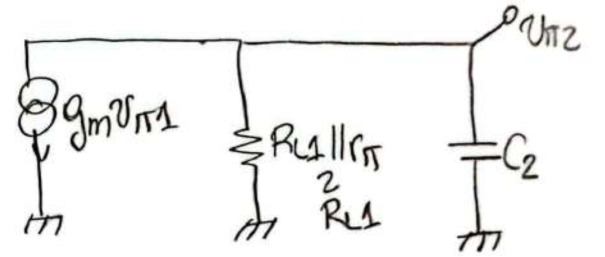
- $\frac{V_{BQ1}}{V_{in}} = \frac{R_{in1}}{R_{in1}+R_S} = \frac{r_\pi}{r_\pi + R_S} = 0,57$
- $G_1 = -g_m (R_{L1} \parallel \underset{r_\pi}{\underset{\shortparallel}{R_{in2}}}) \simeq -g_m R_{L1}$ $\quad r_\pi >> R_{L1}$ $\quad \left(\underset{\text{si } R_{L1}=150\Omega}{= -11,6} \quad \text{ó} \quad \underset{\text{si } R_{L1}=300\Omega}{-23,1} \right)$
- $G_2 = -g_m R_{L2}$

$G = g_m^2 R_{L1} R_{L2} \times 0,57 = g_m^2 R_{LA} R_{LB} \times 0,57 = 152 \frac{V}{V}$ (No depende de la opción elegida) b)



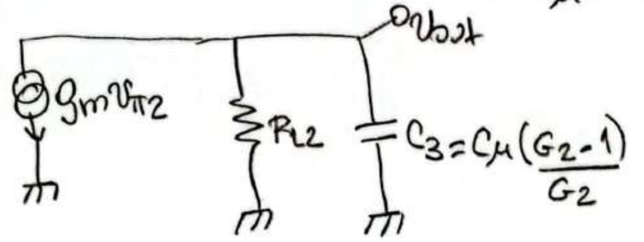
Aplicando Miller y simplificando:





$C_1 = C_\pi + C_\mu(1-G_1)$

$C_2 = C_\pi + C_\mu(1-G_2) + C_\mu \frac{(G_1-1)}{G_1}$



$C_1 = C_\pi + C_\mu(1-G_1)$

$C_2 \cong C_\pi + 2C_\mu - G_2 C_\mu$

$\downarrow$

$G_1 \gg 1$

$C_3 \simeq C_\mu$

$\downarrow$

$G_2 \gg 1$

Por efecto Miller la capacidad C_μ pasa amplificada a la entrada del BJT y con un factor ~ 1 a la salida.

Entonces:

1) El nodo de la entrada a la 2ª etapa tiene una capacidad más grande conectada a tierra que el nodo de la salida de la 2ª etapa ($C_2 > C_3$), por lo tanto conviene que la resistencia más chica esté conectada a la entrada de dicha etapa, de modo de reducir el producto RC y aumentar la frecuencia del polo asociado:

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_{L1} C_2} \qquad f_{p3} = \frac{1}{2\pi R_{L2} C_3}$$

$$R_{L1}C_2 = R_{L1}C_\pi + 2R_{L1}C_\mu - G_2 C_\mu R_{L1}$$
$$= R_{L1}C_\pi + 2R_{L1}C_\mu + g_m R_{L2} R_{L1} C_\mu$$
$$R_{L2}C_3 = R_{L2}C_\mu$$

$\Longrightarrow R_{L1}C_2 > R_{L2}C_3$ para cualquiera de las dos opciones

$\Rightarrow f_{p2}$ es el polo más bajo de los dos y el que puede limitar el ancho de banda, por lo que R_{L1} debe ser la más baja.

2) El nodo de entrada de la 1ª etapa es el que tiene la resistencia más grande conectada ($R_S || R_{in1} \simeq 2{,}26\,k\Omega$) por lo tanto es conveniente que el factor por el que se amplifica C_μ en ese caso sea el menor posible, esto se hace reduciendo la ganancia de la 1ª etapa, por lo que es mejor que R_{L1} sea la más baja

Por ambas razones: $R_{L1} = R_{LA} = 150\,\Omega$

$R_{L2} = R_{LB} = 300\,\Omega$

c) $f_{p1} = \dfrac{1}{2\pi C_1 (R_S || r_\pi)}$ $\quad f_{p2} = \dfrac{1}{2\pi C_2 R_{L1}}$ $\quad f_{p3} = \dfrac{1}{2\pi C_3 R_{L2}}$

$C_1 = C_\pi + C_\mu (1 - G_1)$ $\quad C_2 = C_\pi + 2C_\mu - G_2 C_\mu$ $\quad C_3 = C_\mu$

$C_\mu = 10\,pF$

$f_T @ 5mA = \dfrac{g_m @ 5mA}{2\pi (C_\pi @ 5mA + C_\mu)} \Rightarrow C_\pi @ 5mA = \dfrac{5mA}{26mV \times f_T @ 5mA \times 2\pi} - C_\mu = 143\,pF$

$C_\pi = C_{je} + \alpha I_C \Rightarrow \dfrac{C_\pi @ 5mA - C_{je}}{5mA} = \alpha = 17\,\dfrac{pF}{mA}$

$C_\pi @ 2mA = C_{je} + \alpha (2mA) = 94\,pF$

$G_1 = -g_m R_{L1} = -(77mS)(150\,\Omega) = -11{,}6\ V/V$

$G_2 = -g_m R_{L2} = -(77mS)(300\,\Omega) = -23{,}1\ V/V$

$C_1 = 220\,pF$ $\quad \boxed{f_{p1} = 320\,KHz}$ ← Polo dominante

$C_2 = 345\,pF$ $\quad f_{p2} = 3{,}1\,MHz$

$C_3 = 10\,pF$ $\quad f_{p3} = 53\,MHz$

a) $P_L = \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L} \Rightarrow \hat{V}_o = \sqrt{2 P_L R_L} = \sqrt{2 \cdot 9 \cdot 8} = 12V$

Asumo V_{BE} y $V_{CE_{SAT}}$ despreciables $\Rightarrow$ $\boxed{V_{CC} = 12V}$

$$I_{BIAS} = I_{Q_1} + I_{R_{12}} + I_{B_{N1}} \Rightarrow I_{Q_1} = I_{BIAS} - I_{R_{12}} - I_{B_{N1}}^{MAX} > I_{Q_1}^{MIN}$$

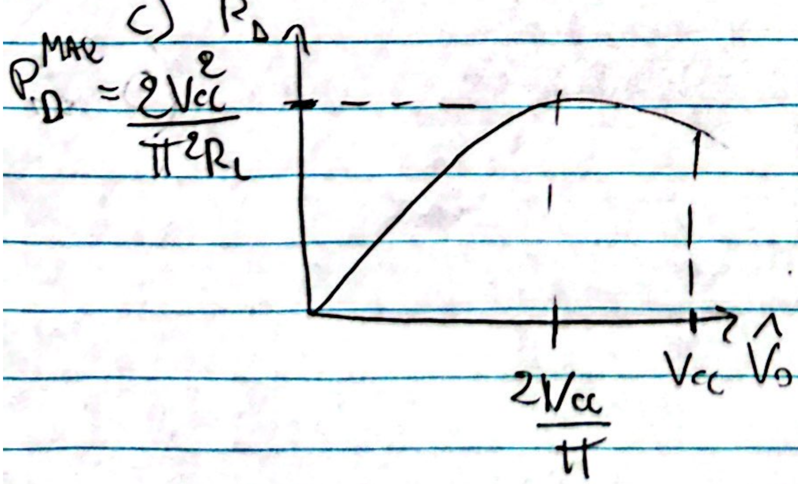
$$\Rightarrow I_{BIAS}^{MIN} = I_{Q_1}^{MIN} + I_{R_{12}} + \frac{\hat{V}_o}{\beta R_L}$$

$$\left.\begin{aligned} I_{Q_1}^{MIN} &= 0{,}5\,mA \\ I_{R_{12}} &= V_{BE_1}/R_1 = 0{,}5\,mA \\ \hat{V}_o/\beta R_L &= 12/20 \cdot 8 = 75\,mA \end{aligned}\right\} \Rightarrow \boxed{I_{BIAS}^{MIN} = 76\,mA}$$

b)
$$\left.\begin{aligned} P_L &= \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L} \\ P_S &= \frac{2}{\pi}\frac{\hat{V}_o V_{CC}}{R_L} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\hat{V}_o}{V_{CC}} \xrightarrow{\hat{V}_o = V_{CC}} \eta = \frac{\pi}{4}$$

$\Rightarrow \boxed{\eta = 78{,}5\%}$

c)



$\boxed{P_D^{MAX} = 3{,}65\,W}$

d) Asumo $P_{D_{QN1}}^{MAX} = P_{D_{QN2}}^{MAX} + P_{QP}^{MAX} = \frac{P_D^{MAX}}{2} = 1,82\,W$

$\Rightarrow P_{D_{QN1}}^{MAX}$ es más limitante $\Rightarrow$

$$T_J^{MAX} - T_A = P_{D_{QN1}}^{MAX}(\theta_{JC} + \theta_{CA}) \Rightarrow T_A = T_J^{MAX} - P_{D_{QN1}}^{MAX}(\theta_{JC} + \theta_{CA})$$

$$\boxed{T_A = 28,7°C}$$

e) <u>Para Q_{N1}</u> (más limitante que Q_{N2})

$$T_A = T_J^{MAX} - P_{D_{QN1}}^{MAX}(\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA})$$

$$T_A = 160 - 1,82\left(2 + 0,5 + \frac{1/0,01}{6}\right) = 125°C$$

<u>Para Q_P</u>

Asumo $V_{EC_p} = V_{CE_{N2}} \Rightarrow i_{Cp} = \frac{i_{CN2}}{\beta} \Rightarrow P_{Dp} = \frac{P_{DN2}}{\beta}$

$$T_A^* = 125 - (\overset{10}{\theta_{JC}} + \overset{150}{\theta_{CA}})\overset{\frac{1,82}{20}}{P_{DP}} = 118°C$$

$$\boxed{T_A^{MAX} = 118°C}$$

a) Como el V de todos los transistores es el mismo y los transistores son idénticos

$$\Rightarrow I_{C1i} = I_{C1j} \quad , \forall i \in (1 \ldots n), \ \forall j \in (1 \ldots m)$$

$$\Rightarrow I_1 = n \cdot I_{C1} \ , \ I_2 = m \cdot I_{C2}$$

$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{n}{m}$$

b)

$$\left.\begin{array}{l} V_{EB3} = V_{EB4} + R I_2 \\ \quad \| \qquad\qquad \| \\ V_T \ln \frac{I_1}{I_S} \quad V_T \ln \frac{I_2}{I_S} \end{array}\right\} \Rightarrow R I_2 = V_T \ln \frac{I_1}{I_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_1 = I_2 \cdot e^{\frac{R I_2}{V_T}}}$$

c) $I_L = I_{C5} = \frac{I_2}{m} = \frac{I_1}{n}$, pues $Q5 = Q2j = Q1i$

Al conectar los dos circuitos:

$$I_1 = \cancel{I_2}\, e^{R I_2 / V_T} = \frac{n}{m} \cdot \cancel{I_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_2 = \frac{V_T}{R} \cdot \ln \frac{n}{m}} \Rightarrow \boxed{I_L = \frac{V_T}{R \cdot m} \cdot \ln \frac{n}{m}}$$

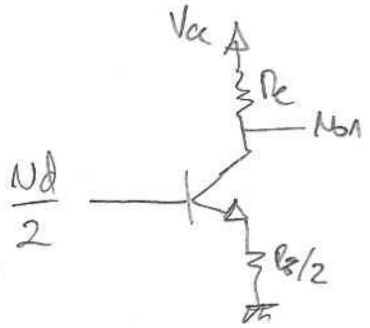
d) Como las corrientes deben ser positivas, sino los transistores cortarían $\Rightarrow \boxed{n > m}$

e) $I_L \propto T$, pues $V_T = \frac{kT}{q} \propto T$, es el único elemento dependiente de la temperatura en I_L

ⓐ $\dfrac{v_{o2} - v_{o1}}{v_1 - v_2}$ y $R_{in\,dif}$?

$g_m = \dfrac{I_o}{V_T}$ para ambos circuitos

Fig 1: Por simetría analizo mitad de circuito para calcular la ganancia: $v_1 - v_2 = v_d$

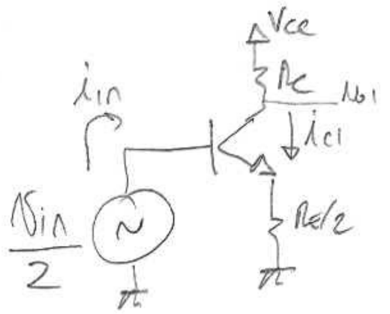


$$\Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_d/2} = \frac{-g_m R_C}{1 + g_m R_E/2}$$

Analogamente: $\dfrac{v_{o2}}{-v_d/2} = \dfrac{-g_m R_C}{g_m R_E/2 + 1}$ $\Rightarrow$

$$\Rightarrow \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_d/2} = \frac{-2 g_m R_C}{g_m R_E/2 + 1} \Rightarrow \boxed{\frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_1 - v_2} = \frac{g_m R_C}{1 + g_m R_E/2}}$$

También analizo medio circuito para calcular $R_{in\,dif} = \dfrac{v_{in}}{i_{in}}$



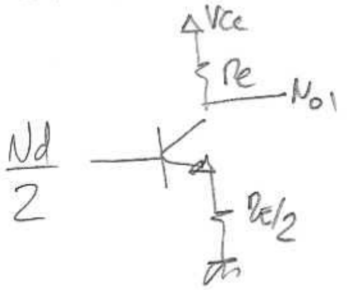
$$i_{c1} = \beta i_{in}$$

$$i_{c1} = \frac{0 - v_{o1}}{R_C} = \frac{-1}{\cancel{R_C}} \cdot \frac{-g_m \cancel{R_C}}{1 + g_m R_E/2} \cdot \frac{v_{in}}{2}$$

$\Rightarrow$

$$\Rightarrow \beta i_{in} = \frac{g_m}{2(1 + g_m R_E/2)} v_{in} \Rightarrow \boxed{R_{in\,dif} = 2 r_\pi + \beta R_E}$$

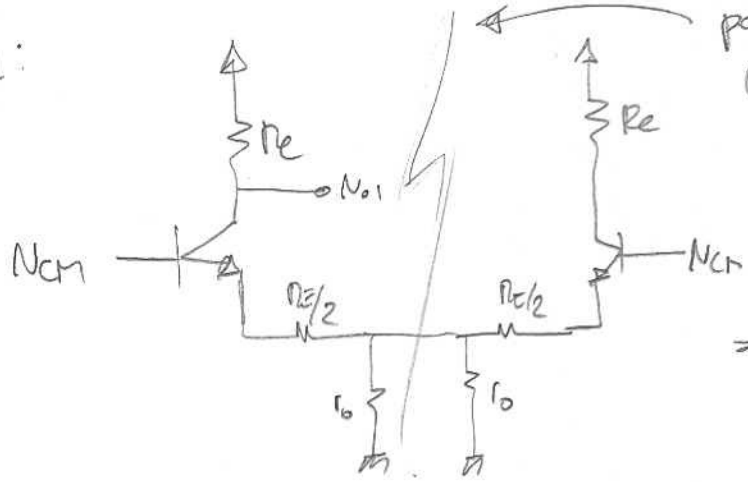
(a) Fig 2: Por simetría analizo la mitad del circuito, y en pequeña señal obtenemos el mismo circuito:



$$\Rightarrow \boxed{\frac{v_{o2}-v_{o1}}{v_1-v_2} = \frac{g_m R_c}{g_m R_E/2 + 1}}$$ y

$$\boxed{R_{in\,dif} = 2r_\pi + \beta R_E}$$

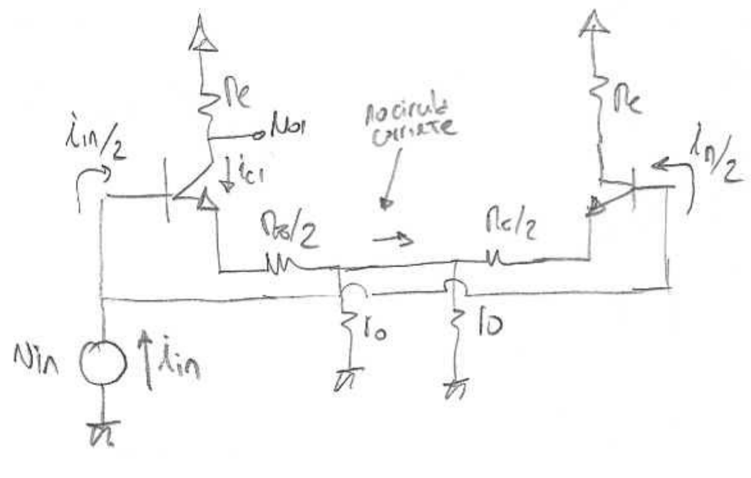
(b) Fig 1:



por simetría analizo la mitad (no pasa corriente de una mitad a la otra)

$$\Rightarrow \boxed{\frac{v_{o1}}{v_{cm}} = \frac{-g_m R_c}{1+g_m\left(r_o+R_E/2\right)}}$$

$$R_{incm} = \frac{v_{in}}{i_{in}}$$



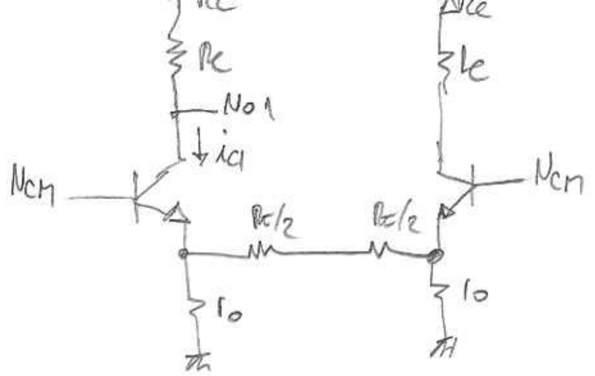
$$i_{c1} = \beta \frac{i_{in}}{2}$$

$$i_{c1} = \frac{-v_{o1}}{R_c} = \frac{g_m \cancel{R_c}}{1+g_m(r_o+R_E/2)} \cdot \frac{v_{in}}{\cancel{R_c}}$$

$$\Rightarrow \frac{\beta}{2} i_{in} = \frac{g_m v_{in}}{\left[1+g_m\left(r_o+R_E/2\right)\right]} \Rightarrow$$

$$\boxed{R_{incm} = \frac{r_\pi}{2} + \frac{1}{2}\beta\left(r_o+R_E/2\right)}$$

(b) Fig 2:



Notar que no circula corriente por $R_E/2$ $\Rightarrow$ $\boxed{\dfrac{N_{o1}}{N_{cm}} = \dfrac{-g_m R_C}{1+g_m r_o}}$

$$R_{inCM} = \frac{N_{in}}{i_{in}}$$

$$i_{C1} = \beta \frac{i_{in}}{2}$$

$$i_{C1} = \frac{-N_{o1}}{R_C} = \frac{1}{\cancel{R_C}} \cdot \frac{g_m \cancel{R_C}}{1+g_m r_o} \cdot N_{in}$$

$\Rightarrow \boxed{R_{inCM} = \frac{1}{2}\left(r_\pi + \beta r_o\right)}$

(c) $ICMR = \left[V_{cm}^{MIN}, V_{cm}^{MAX}\right]$

Fig 1: $V_{cm} - V_{BE} - V_{IO} - \frac{R_E I_o}{2} \geq 0 \Rightarrow \boxed{V_{cm}^{MIN} = V_{BE} + V_{IO} + \frac{R_E I_o}{2}}$

$V_{CC} - R_C I_o - (V_{cm} - V_{BE}) \geq V_{CESAT} \Rightarrow \boxed{V_{CM}^{MAX} = V_{CC} - R_C I_o + V_{BE} - V_{CESAT}}$

Fig: 2: $V_{CC} - R_C I_o - (V_{cm} - V_{BE}) \geq V_{CESAT} \Rightarrow \boxed{V_{CM}^{MAX} = V_{CC} - R_C I_o + V_{BE} - V_{CESAT}}$

$V_{cm} - V_{BE} \geq V_{IO} \Rightarrow \boxed{V_{CM}^{MIN} = V_{IO} + V_{BE}}$