

Circuitos Eletrônicos Analógicos

2a Avaliação - 20/11/17

Sem Consulta - Duração: 2h 40min

Nome: \_\_\_\_\_

Justifique sucintamente as passagens  
A interpretação é parte integrante da questão

**Questão 1 (Valor 3.5)** - Considerando transistores QN, QP e Q1 com os parâmetros listados e assumindo as hipóteses necessárias:

- a) (valor 1.25) Projetar o circuito linear da Figura 1, tendo como condição quiescente  $I_{QN\_quies} = I_{QP\_quies} = 5\text{mA}$ ,  $I_{Q1\_quies} = 3\text{mA}$  e  $V_{o\_max} = 5\text{V}$ . Admitir que  $I_{Q1}$  permaneça aproximadamente constante.

$$\begin{aligned} I_{C\_QN} = 5\text{mA} &\rightarrow V_{BE\_QN} = 0.025 \cdot \ln(5\text{m}/0.5\text{p}) = 0.575\text{V} \\ I_{C\_QP} = 5\text{mA} &\rightarrow V_{BE\_QP} = 0.025 \cdot \ln(5\text{m}/0.24\text{p}) = 0.593\text{V} \\ V_{BB} &= 0.575 + 0.593 = 1.168\text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{BE\_Q1} &= 0.025 \cdot \ln(3\text{m}/0.024\text{p}) = 0.638\text{V} \\ V_{BB} &= 0.638\text{V} \cdot (1 + R_2/R_1) = 1.168\text{V} \rightarrow R_2/R_1 = 0.83 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{Seja } R_1 = 1 \text{ K}\Omega \rightarrow R_2 = 0.83 \text{ K}\Omega$$

Semiciclo positivo:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_{R3} \cdot R_3 + V_{BE\_QN} + V_{L\_max} \\ I_{Lmax} &= 5/8 = 625\text{mA} \\ V_{BE\_QN} @ 625\text{mA} &= 0.025 \ln(625\text{m}/0.5\text{p}) = 0.696\text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{R3} &= I_{R2} + I_{C\_Q1} + V_{Lmax}/\beta \cdot R_L \\ I_{R3} &= 0.64/1\text{K} + 3\text{m} + 5/(450 \cdot 8) = 0.64\text{m} + 3\text{m} + 1.4\text{m} = 5.04\text{mA} \\ I_{C\_QN} = 625\text{mA} &\rightarrow V_{BE\_QN} = 0.025 \cdot \ln(625\text{m}/0.5\text{p}) = 0.696\text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 7.5\text{V} &= 5.04\text{m} \cdot R_3 + 0.696\text{V} + 5\text{V} \\ \rightarrow R_3 &= 357 \text{ Ohms} \end{aligned}$$

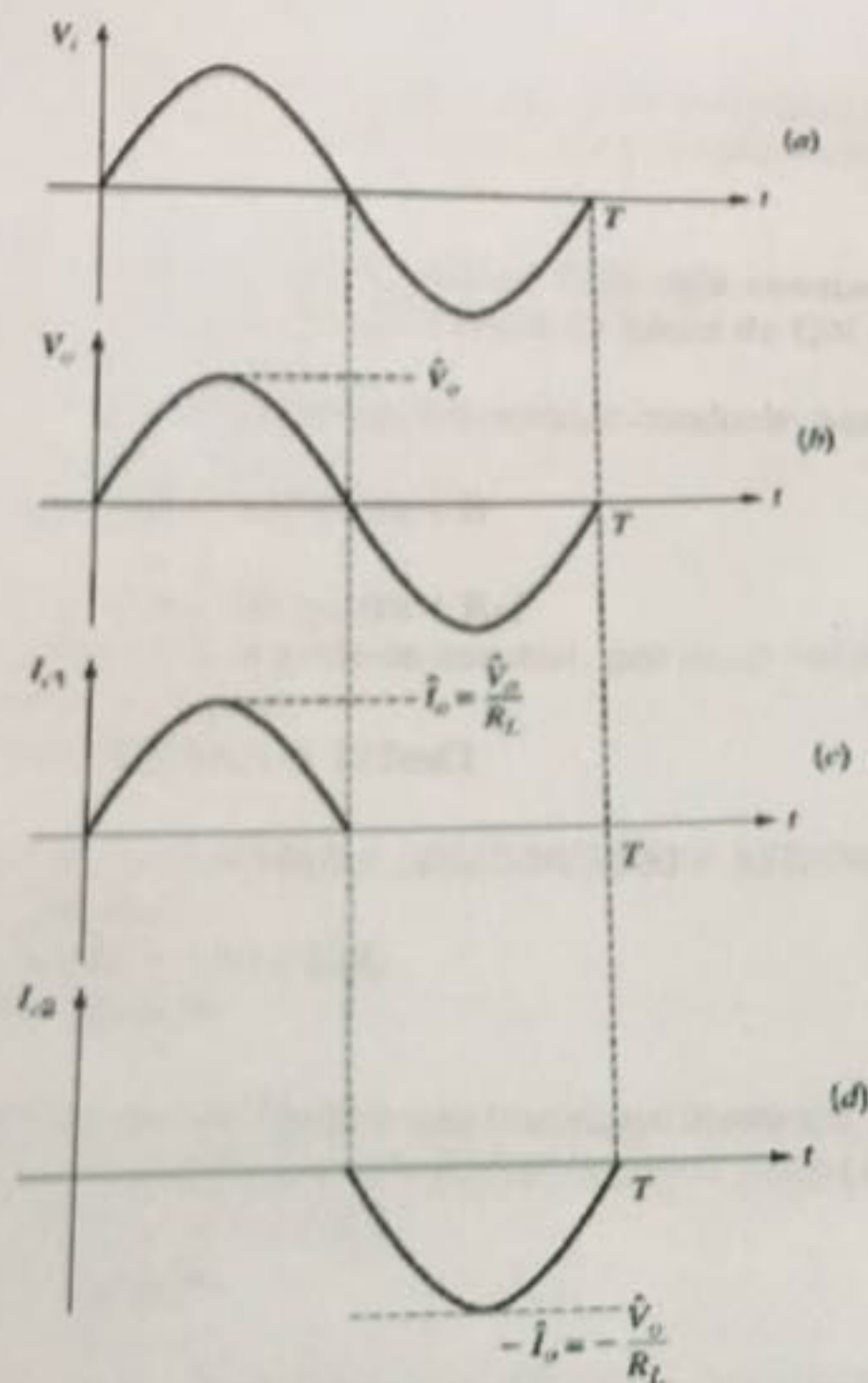
Semiciclo negativo:

$$\begin{aligned} -V_{CC} &= -I_{R4} \cdot R_4 - V_{BE\_QN} + V_{L\_max} \\ I_{Lmax} &= 5/8 = 625\text{mA} \\ V_{BE\_QP} @ 625\text{mA} &= 0.025 \ln(625\text{m}/0.24\text{p}) = 0.714\text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{R4} &= I_{R1} + I_{C\_Q1} + V_{Lmax}/\beta \cdot R_L \\ I_{R4} &= 0.64/1\text{K} + 3\text{m} + 5/(300 \cdot 8) = 0.64\text{m} + 3\text{m} + 2\text{m} = 5.64\text{mA} \\ -7.5\text{V} &= -5.64\text{m} \cdot R_4 - 0.714\text{V} - 5\text{V} \\ \rightarrow R_4 &= 316 \text{ Ohms} \end{aligned}$$

- b) (valor 0.5) Tendo como referência vin senoidal, esboçar, em detalhes, as formas de onda das correntes  $I_{C\_QN}$ ,  $I_{C\_QP}$  e  $I_{RL}$ , na condição de  $V_{o\_max} = 5\text{V}$ .





c) (valor 0.75) Deduza a expressão de eficiência do estágio. Qual a eficiência na condição de amplitude de 2.5V à saída?

$$I_{\text{supply}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{c1}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{\hat{V}_o}{R_L} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt = \frac{1}{\pi} \frac{\hat{V}_o}{R_L} = \frac{1}{\pi} \hat{I}_o$$

$$P_{\text{supply}} = 2V_{CC} I_{\text{supply}} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC}}{R_L} \hat{V}_o \quad P_L = \frac{1}{2} \frac{\hat{V}_o^2}{R_L}$$

$$\boxed{\eta_C = \frac{P_L}{P_{\text{supply}}} = \frac{\pi}{4} \frac{\hat{V}_o}{V_{CC}}}$$

$$P_L = 0.5 \times 2.5^2 / 8 = 0.39 \text{ W}$$

$$P_{DC} = 2 \times 7.5 \times 0.312 / 3.14 = 1.49 \text{ W}$$

$$\eta = (3.14 / 4) \times 2.5 / 7.5 \times 100 = 26.2\%$$

- d) (valor 1.0) Considerando o dimensionamento proposto no item a), determinar CB para se processar um sinal na banda 100Hz – 16KHz. Admita  $V_{in}$  com  $R_{source} = 0$ .

→ Considera-se que a tensão  $V_{BB}$  seja constante, ou seja, no modelamento pode ser considerado um curto entre as bases de QN e QP;

- Seja o caso de apenas um transistor conduzir; por ex QN (semiciclo positivo).

Rin visto pelo terminal de CB:

$$R_{in} = R_4 // R_3 // \beta_{QN} (r_e + R_L)$$

Para cálculo de  $r_e$  pode-se assumir, por ex, o valor médio de  $I_{C\_QN}$  no ciclo positivo =  $625\text{mA}/\pi \approx 200\text{mA}$ .

$$r_e = 25\text{mV}/200\text{mA} = 125\text{m}\Omega$$

$$R_{in} = 300 // 330 // 450 \times 8 = 300 // 330 / 3600 = 157 // 3600 \approx 150\Omega$$

$$f_c = 50\text{Hz (ex)}$$

$$50 = 1/(6.28 \times 150 \times CB)$$

$$\rightarrow CB = 21.2\mu\text{F}$$

- ou seja o caso de apenas um transistor conduzir; por ex QP (semiciclo negativo).

$$R_{in} = 300 // 330 // 300 \times 8 = 300 // 330 / 1800 = 157 // 1800 \approx 145\Omega$$

$$50 = 1/(6.28 \times 145 \times CB)$$

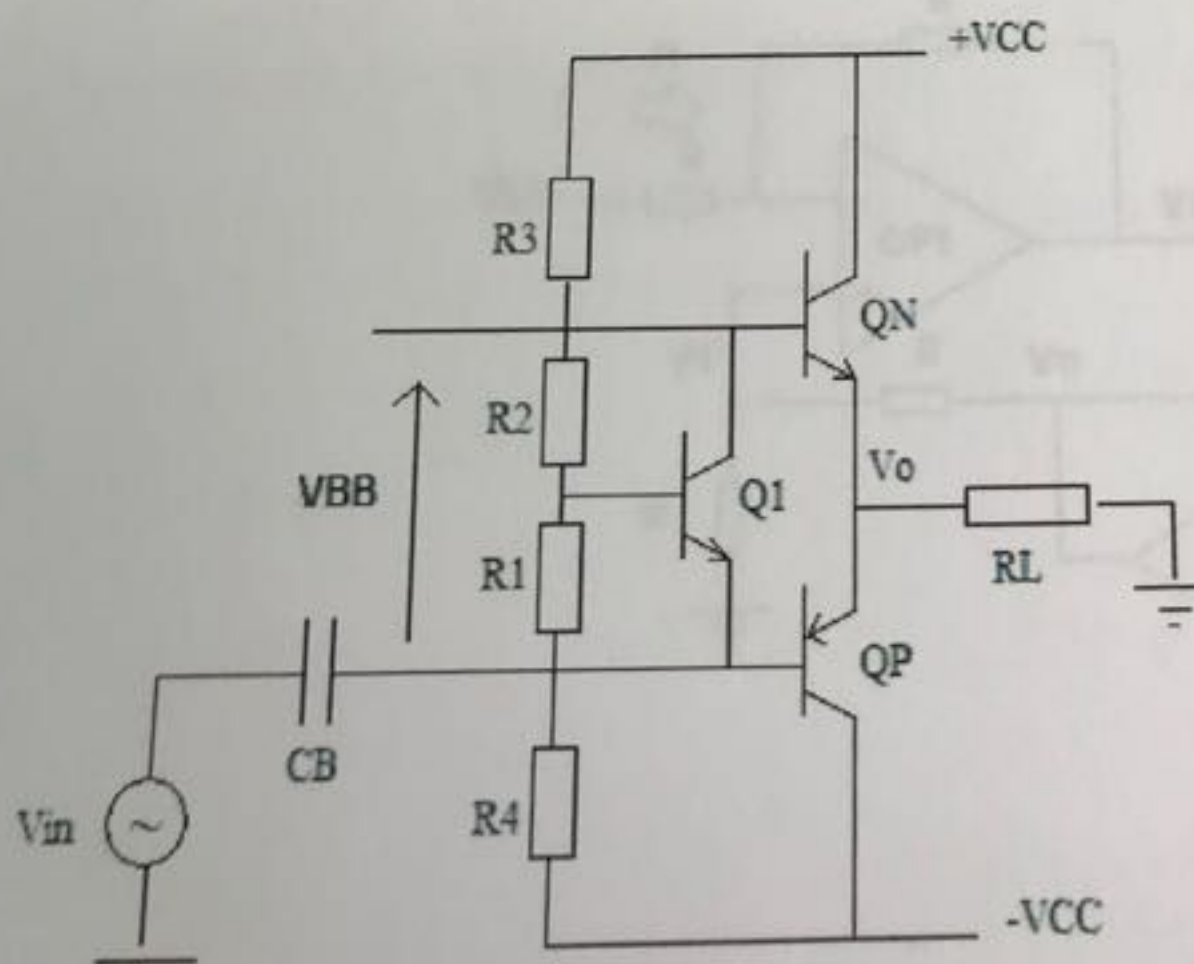
$$\rightarrow CB = 22.4\mu\text{F}$$

- ou seja o caso de ambos transistores conduzirem;

$$r_e \approx 25\text{mV}/5\text{mA} = 5\Omega$$

$$R_{in} = 300 // 330 // [450 \times (8+5)] // [300 \times (8+5)] = 300 // 330 / 5200 // 3900 = 157 // 2230 \approx 146\Omega$$

$$\rightarrow CB = 22.4\mu\text{F}$$



$$I_{S\_QN} = 0.5\text{pA}$$

$$I_{S\_QP} = 0.24\text{pA}$$

$$I_{S\_Q1} = 0.024\text{pA}$$

$$\beta_{QN} = 450$$

$$\beta_{QP} = 300$$

$$\beta_{Q1} = 300$$

$$V_{CC}/-V_{CC} = +7.5/-7.5\text{V}$$

$$V_T = 25\text{mV}$$

$$I_{C\_Q1} = 3\text{mA} \approx \text{constante}$$

$$R_L = 8\Omega$$

Figura 1



**Questão 2 (Valor 1.5)** - Um amplificador realimentado negativamente em configuração série-paralelo foi projetado. Utilizou-se um opamp com  $r_i = 100\text{K}\Omega$  e  $r_o = 100\Omega$ . Durante teste com entrada senoidal, aplicou-se realimentação com  $\beta = 0.4$ , medindo-se  $r_{of} = 0.25\Omega$ . Admitindo-se que o opamp seja a polo dominante, com banda passante BW = 15Hz e frequência de ganho unitário 3MHz, em que frequência de sinal o teste ocorreu?

Opamp: GBW =  $G \cdot 15\text{Hz} = 3\text{MHz}$

G (malha aberta, baixas frequências)  $A_{DC} = 200\text{k V/V}$

$$r_{of} = r_o / (1 + \beta A_f) = 100 / (1 + 0.4 \times A_f) = 0.25$$

$$1 + 0.4 A(f) = 100 / 0.25 = 400$$

$$A(f) \cong 400 / 0.4 = 1\text{k} = 60\text{dB}$$

Tendo-se a queda 20dB/dec, a frequência de medição está 3 décadas abaixo de  $f_t = 3\text{MHz}$ , ou seja, 3KHz.

$$A(f) = A_o / (1 + jf/f_c)$$

$$|A(f)| = A_o / [(1 + (f/f_c)^2)^{0.5}]$$

Para  $f/f_c \gg 1$

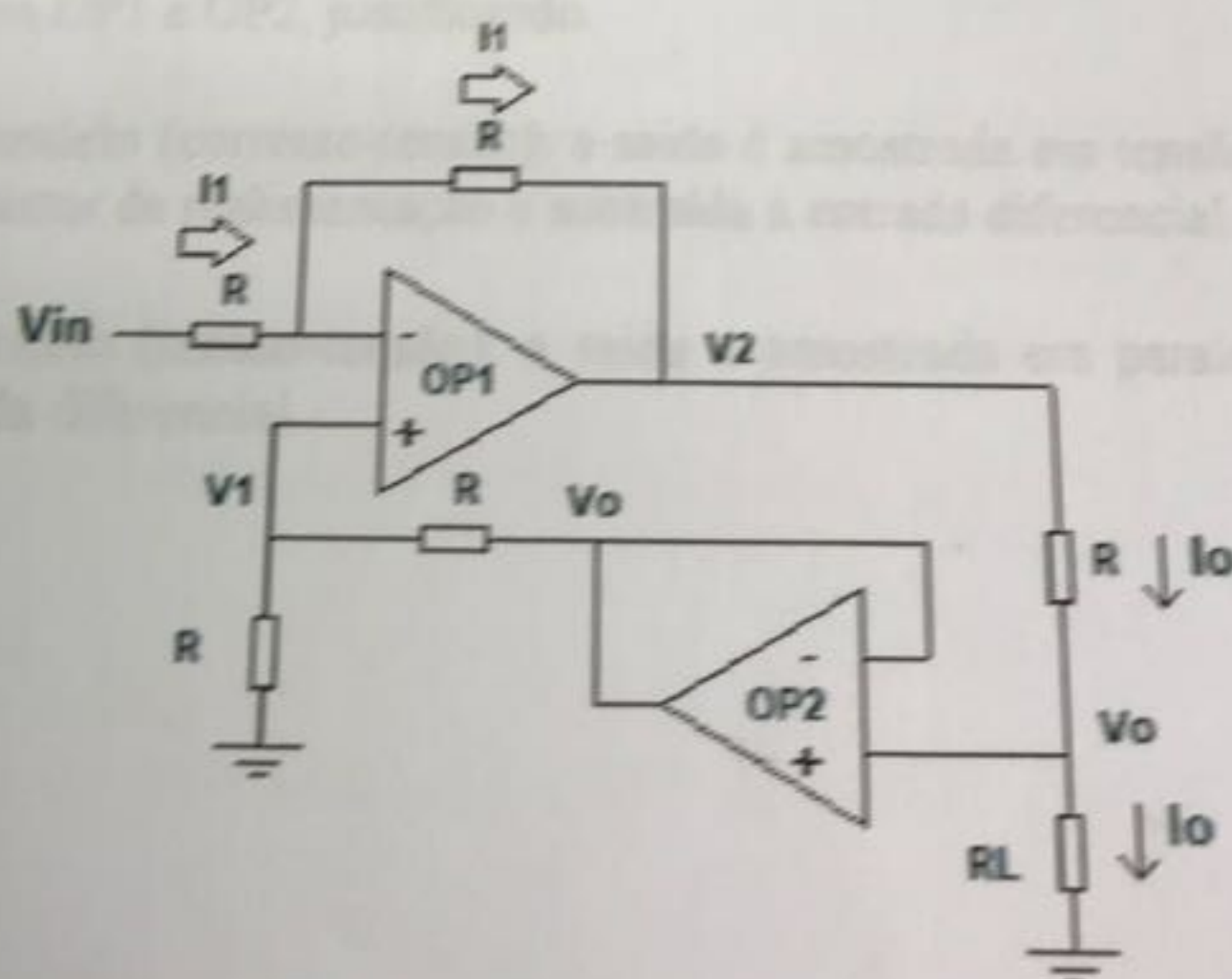
$$|A(f)| = A_o / (f/f_c) \text{ ou } f/f_c = 200\text{k} / 1\text{k} \times f_c = 200 \times 15 = 3\text{KHz}$$

$$|A(f)| = A_o / (f/f_c) \text{ ou } A_o f_c / f = f_t / f = 1\text{K}$$

$$f = f_t / 1\text{K} = 3\text{M} / 1\text{k} = 3\text{KHz}$$

**Questão 3: (Valor 2.0)** - Na Figura 2, considerando amplificadores operacionais ideais e  $R_L$  uma resistência de carga,

a) (valor 1.0) determinar a transferência  $I_o/V_{in}$ ,



$$I_1 R = V_{in} - V_1$$

$$V_2 = V_1 - I_1 R$$

$$V_1 = \frac{V_o}{2}$$

$$I_o = \frac{V_2}{R} - \frac{V_o}{R}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_L}$$

$$R \left( \frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o}{R} \right) = V_2$$

$$R \left( \frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o}{R} \right) = \frac{V_o}{2} - I_1 R$$

$$\frac{R V_o}{R_L} + \frac{V_o}{2} = -I_1 R = V_1 - V_{in} = \frac{V_o}{2} - V_{in}$$

$$\frac{R I_o R_L}{R_L} = -V_{in}$$

$$\frac{I_o}{V_{in}} = -\frac{1}{R}$$

b) (valor 0.5) qual a variação em  $I_o$  ao dobrar-se o valor de  $R_L$ ?

Como  $I_o$  não depende de  $R_L$ , não há variação em  $I_o$ .

c) (valor 0.5) Considerando as não idealidades dos opamps, discuta o mecanismo de realimentação em OP1 e OP2, justificando.

OP1: paralelo-paralelo (corrente-tensão): a saída é amostrada em tensão, convertida em corrente pelo resistor de realimentação e subtraída à entrada diferencial.

OP2: série – paralelo (tensão-tensão): a saída é amostrada em paralelo com  $\beta = 1$  e subtraída à entrada diferencial.



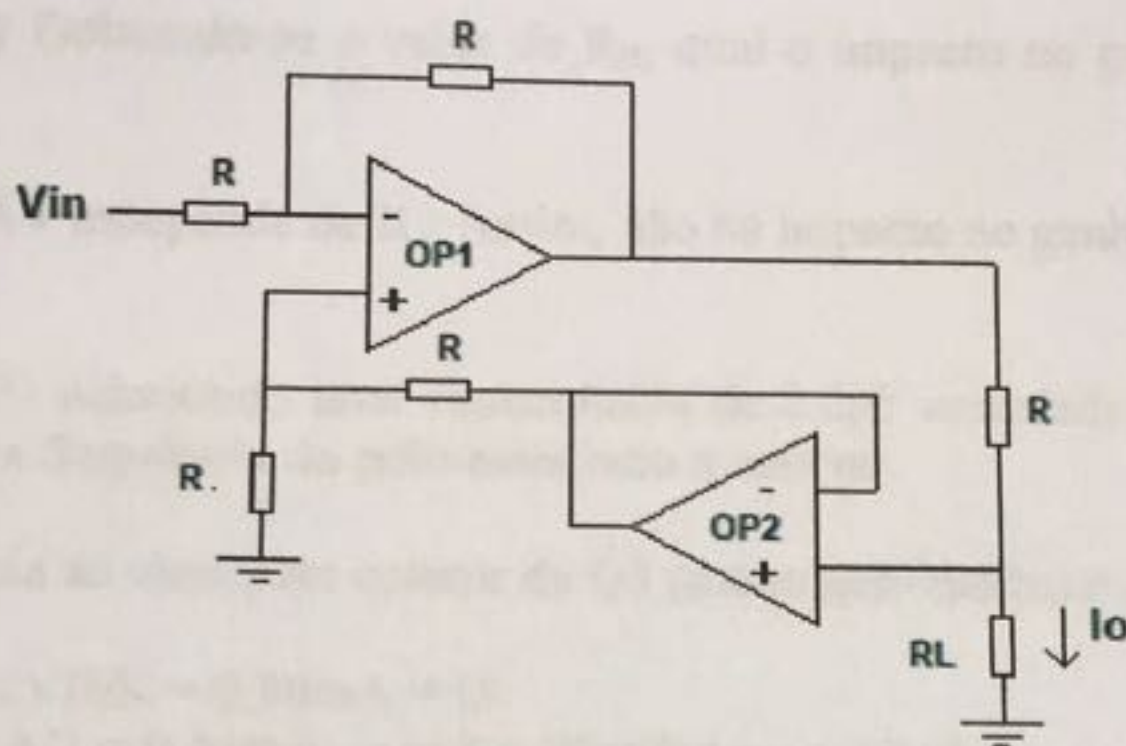
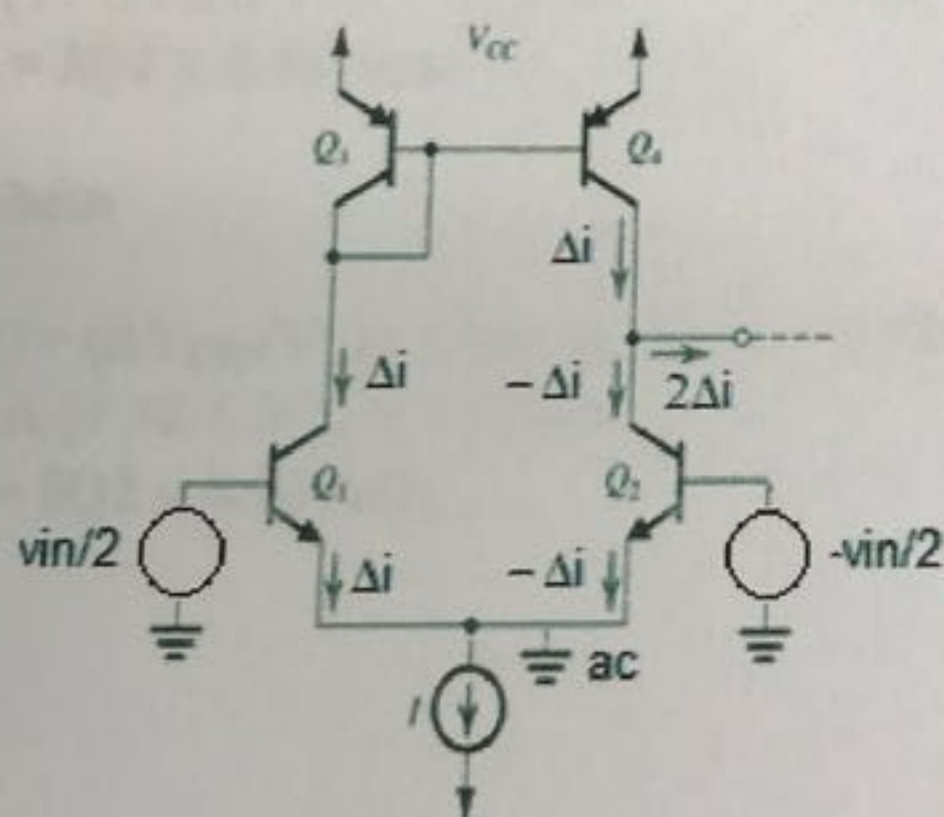


Figura 2

**Questão 4 (Valor 3.0)** – Considere o circuito da Figura 3 e parâmetros listados. Transistores possuem a mesma área de junção emissor-base. Considere, inicialmente, para Q1 – Q4,  $|V_A| = 20V$  e para Q5 - Q7,  $|V_A| \rightarrow \infty$ . Assumindo as hipóteses necessárias,

- a) (valor 1.0) Justificando, determine, literal e numericamente, o ganho de pequenos sinais  $A_v = V_o/V_{in}$ , em médias frequências.



□ Differential gain:

$$A_d \equiv \frac{V_o}{V_{id}} = G_m R_o = g_m (r_{o2} \parallel r_{o4})$$

**Mesmo a saída sendo referenciada ao terra, o ganho é integral**

$$35dB = 56.2$$

$$r_{o1} = r_{o2} = V_A/IC$$

$$r_{out} = r_{o1} \parallel r_{o2} = 0.5 V_A/IC = 0.5 \times 20/0.44m = 22.7k \text{ ohm}$$

$$g_m = IC/V_T$$

$$g_m r_{out} = 0.5 \times V_A/V_T = 0.5 \times 20/25m = 400 \text{ V/V}$$



- b) (valor 0.5) Dobrando-se o valor de  $R_B$ , qual o impacto no ganho calculado no item a?

No caso,  $A_V$  independe de  $I_C$ . Assim, não há impacto no ganho ao se dobrar  $R_B$ .

- c) (valor 0.75) Admitindo uma capacitância de 0.2pF associada ao coletor de Q1, determine a frequência do polo associado a esse nó.

A resistência ac vista pelo coletor de Q3 (montagem diodo) é  $r_{e3} = V_T/I_{C\_Q3}$

$$I_6 = (10 - 1.2)/10K = 0.88mA = I_5$$

$$I_3 = 0.88mA/2 = 0.44mA \rightarrow r_{e3} = 25m/0.44m = 57 \text{ ohms}$$

$$r_{eq} = r_{e3} // r_{o1} = r_{e3} = 57 \text{ ohm}$$

$$f_c = 1/(2 \times 3.14 \times 57 \times 0.2p) \cong 14Ghz$$

- d) (valor 0.75) Considere agora  $|V_A| = 20V$  para Q5 – Q7. Qual o valor da corrente em Q1, Q2?

$$V_{CE\_Q6} = 0.6V$$

$$V_{CE\_Q5} = 5 + [2 - 0.6] = 6.4V$$

$$\Delta V_{CE} = 5.8V$$

Admitindo modelamento simplificado da tensão de Early ( $\Delta I_C$  linear com  $\Delta V_{CE}$ )

$$I_5 = I_6 (1 + \Delta V_{CE}/V_A) = 0.88mA (1 + 5.8/20) = 1.13mA$$

$$\rightarrow I_{Q1} = I_{Q2} \cong 0.567mA$$

**Ou também**

$$I_5 = I_6 [1 + (\Delta V_{CE6}/V_A)/(1 + \Delta V_{CE5}/V_A)] = 0.88mA [1 + (6.4/20)/(1 + (0.6/20))] = 1.13mA$$

$$= 0.88mA [1.32/1.03] \cong 1.13mA$$

$$\rightarrow I_{Q1} = I_{Q2} \cong 0.567mA$$