

## **TE054 - Cap.1 - Amplificadores de Múltiplos Estágios**

### **1.1. Configurações compostas (Amplificadores de dois estágios em cascata)**

Sedra, Cap. 6.8, 6.11 e 7.7.

Boylestad, Cap. 12.2, 12.3, 12.4, 12.5.

### **1.2. Espelho de corrente e guia de corrente**

Sedra, Cap. 6.3, 6.12.2, 6.12.3 e 6.12.4.

Boylestad, Cap. 12.8.

### **1.3. Amplificador diferencial**

Sedra, Cap. 7.1, 7.2 e 7.3.

Boylestad, Cap. 12.9.

### **1.4. Estágios de saída (com BJT)**

Sedra, Cap. 14.1, 14.2, 14.3 e 14.4.

### **Bibliografia:**

“Microeletrônica”, Sedra & Smith, Pearson / Prentice Hall, 2007, 5ª. Edição.

“Dispositivos eletrônicos e Teoria de Circuitos”, Boylestad, Pearson Education do Brasil, 2004, 8ª. Edição.

**Sugestão 1.1 Configurações compostas (Amplificadores de dois estágios em cascata):**

Para os circuitos amplificadores de dois estágios mostrados abaixo, na porta de entrada (cuja tensão é  $v_i$ ) é conectada uma fonte de tensão ca (de tensão em aberto  $v_{sig}$  e resistência interna  $R_{sig}$ ) e na porta de saída (cuja tensão é  $v_o$ ) é conectada uma carga resistiva ( $R_L$ ). Assumindo válida a análise para pequenos sinais, pede-se o ganho de tensão completo  $G_v(R_L, R_{sig}) = v_o/v_{sig}$ .

Dica: Primeiro, obter o ganho de tensão completo  $G_v(R_L, R_{sig})$  do circuito equivalente contendo 6 parâmetros:  $A_{vo1}$ ,  $A_{vo2}$ ,  $R_{in1}$ ,  $R_{in2}$ ,  $R_{o1}$  e  $R_{o2}$ . Segundo, obter os valores dos parâmetros  $A_{vo1}$ ,  $A_{vo2}$ ,  $R_{in1}$ ,  $R_{in2}$ ,  $R_{o1}$  e  $R_{o2}$  por meio de análises em circuitos simplificados, contendo apenas 1 transistor.

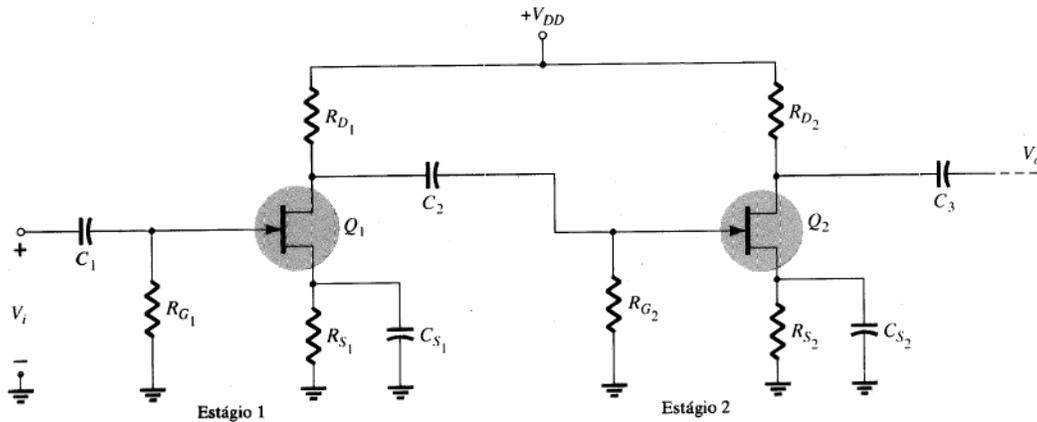


Fig. 1

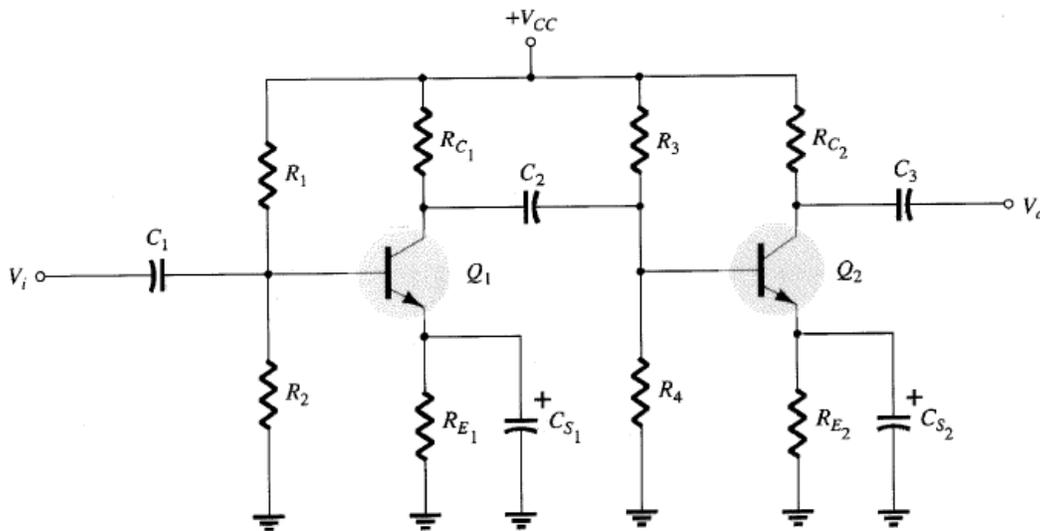


Fig. 2

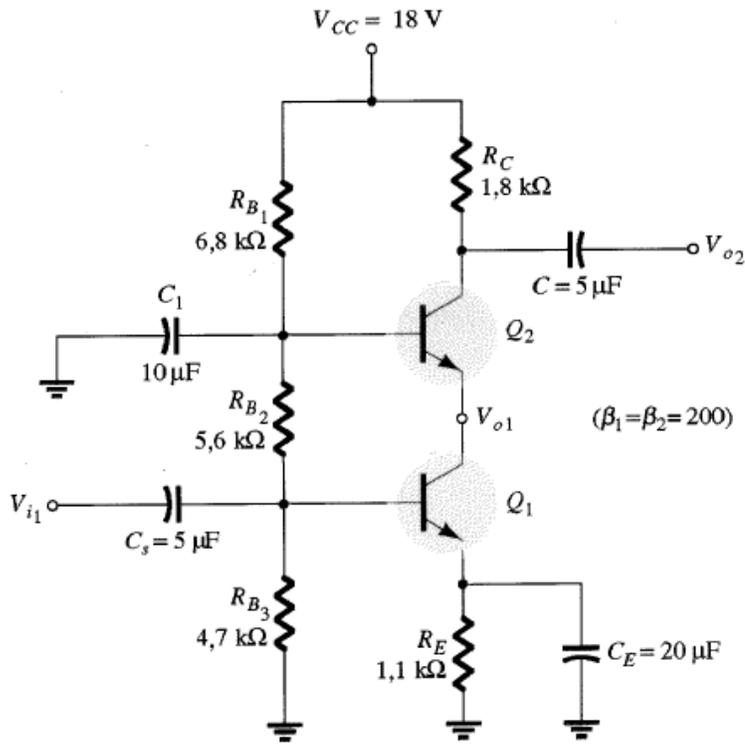


Fig. 3

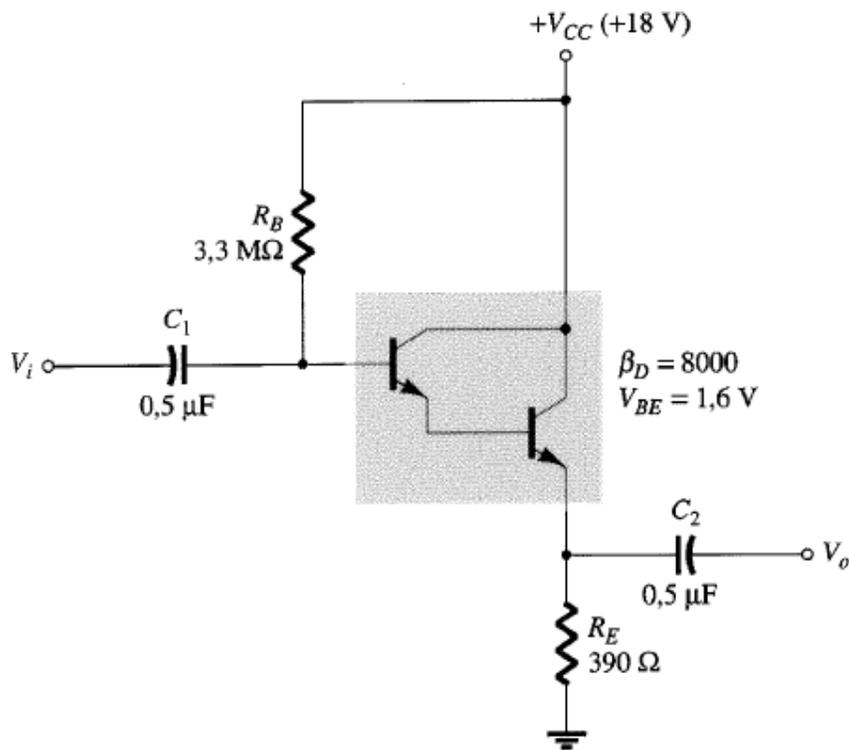


Fig. 4

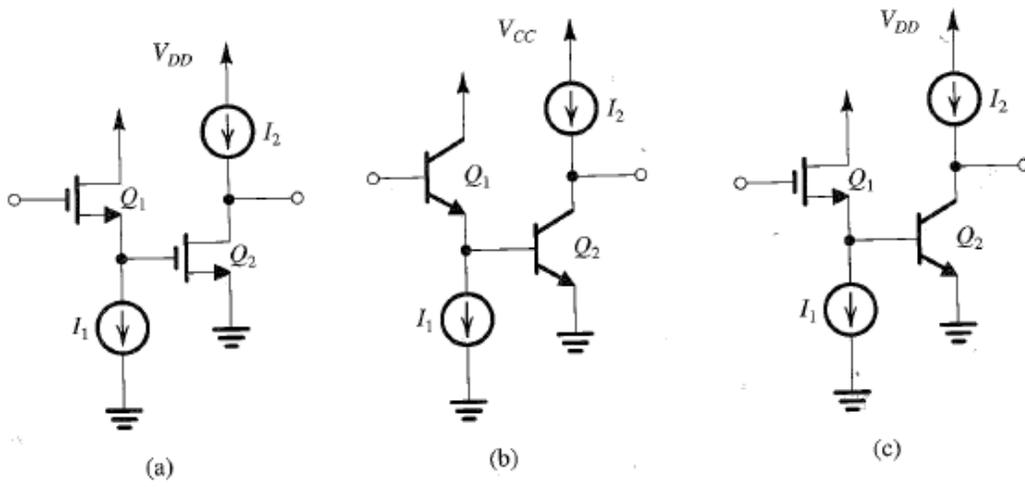


Fig. 5

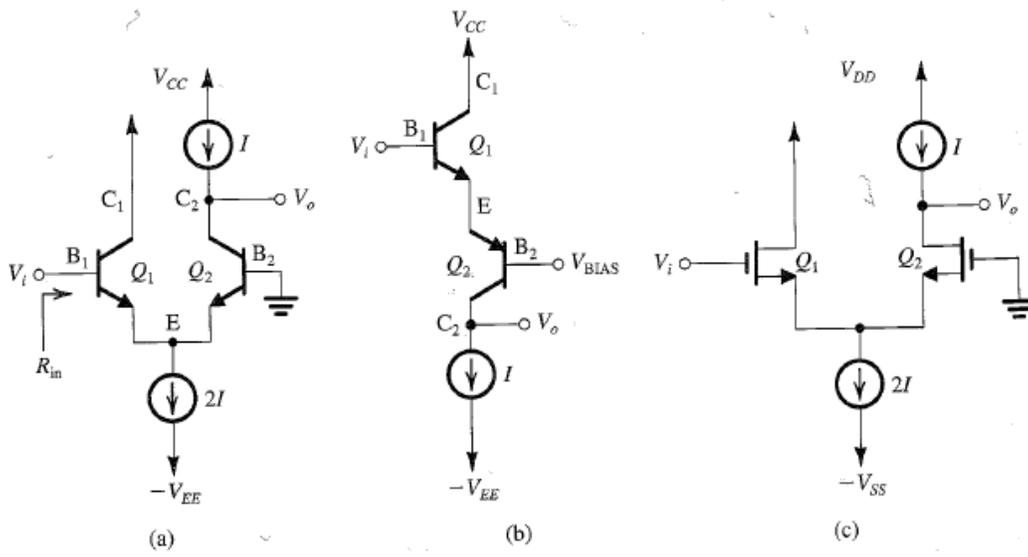


Fig. 6

**Sugestão 1.2 Espelho de corrente:**

Para os circuitos espelhos de corrente mostrados abaixo, assumindo que todos os transistores operem no modo amplificador (ou seja, BJT em modo ativo e MOSFET em modo saturação), pede-se:

- Através de uma análise para grandes sinais, obter a relação  $I_O/I_{REF}$ .
- Assumindo válida a análise para pequenos sinais, calcular a resistência de saída,  $r_o$ , do circuito espelho de corrente.

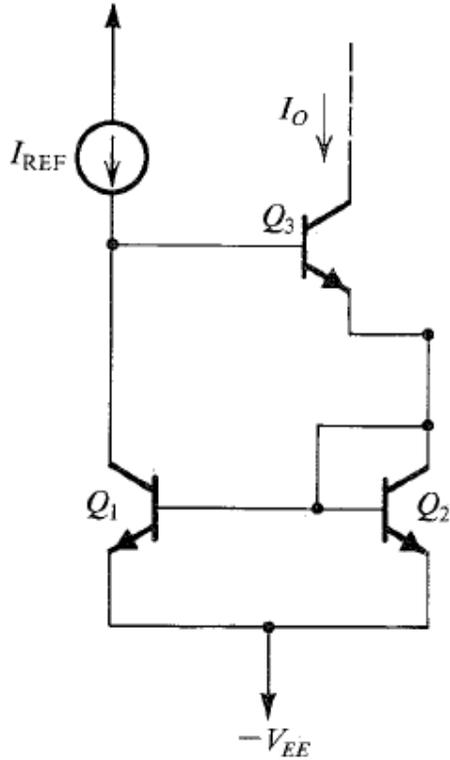


Fig.7

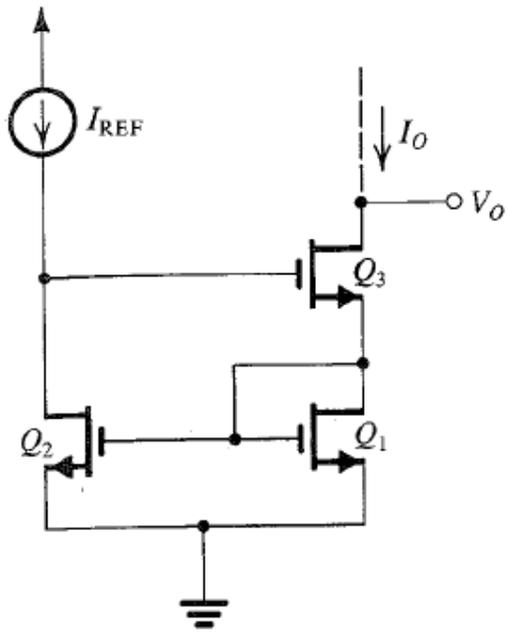


Fig.8

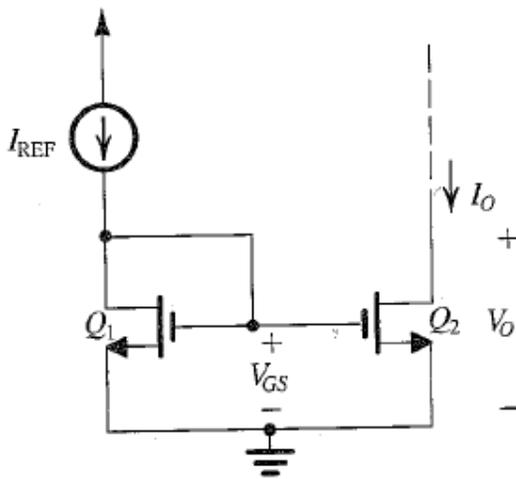


Fig.9

### Sugestão 1.3 Amplificador diferencial:

Para os circuitos amplificadores diferenciais mostrados abaixo, assumindo válida a análise para pequenos sinais, pede-se:

- Obter o ganho de tensão diferencial ( $A_d = v_o / v_{id}$ ). (Dica: a aproximação de meio circuito diferencial é válida)
- Obter o ganho de tensão de modo comum ( $A_{cm} = v_o / v_{icm}$ ). (Dica: a aproximação de meio circuito de modo comum é válida)
- Obter a resistência de entrada diferencial ( $R_{id}$ ). (Dica: a aproximação de meio circuito diferencial é válida)
- Obter a resistência de entrada de modo comum ( $R_{icm}$ ). (Dica: a aproximação de meio circuito de modo comum é válida)
- Obter a resistência de saída ( $R_o$ ).

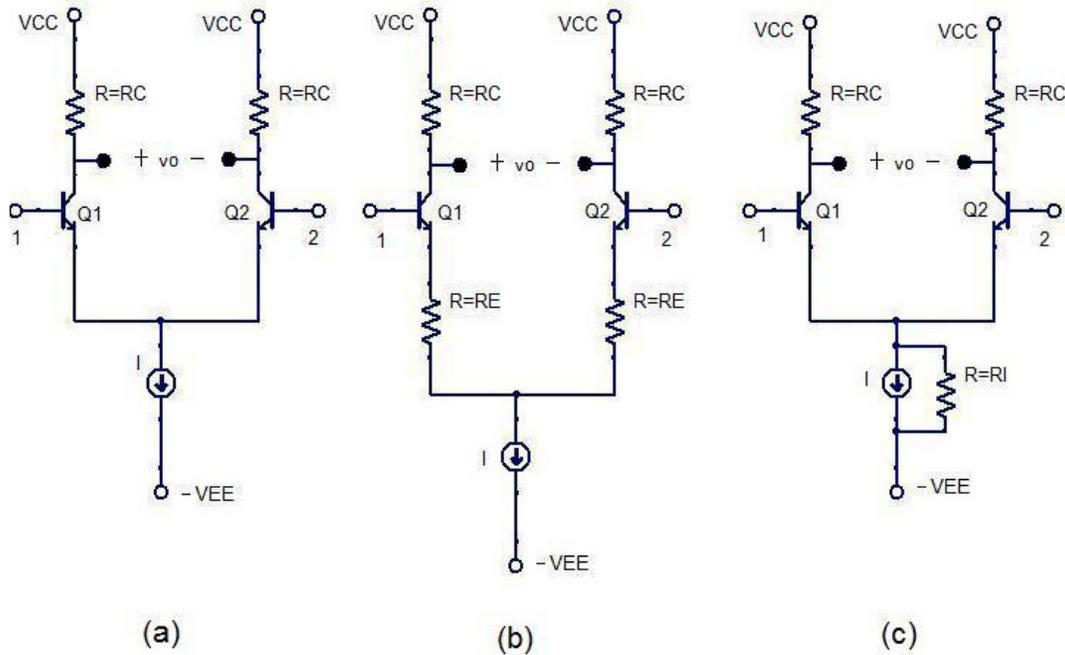


Fig.10

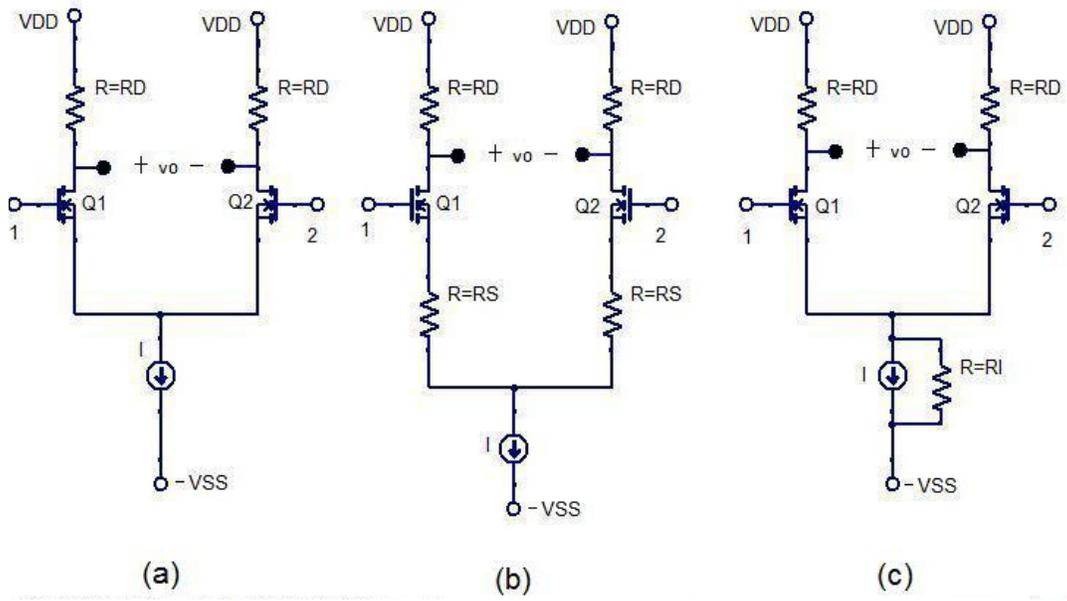


Fig.11

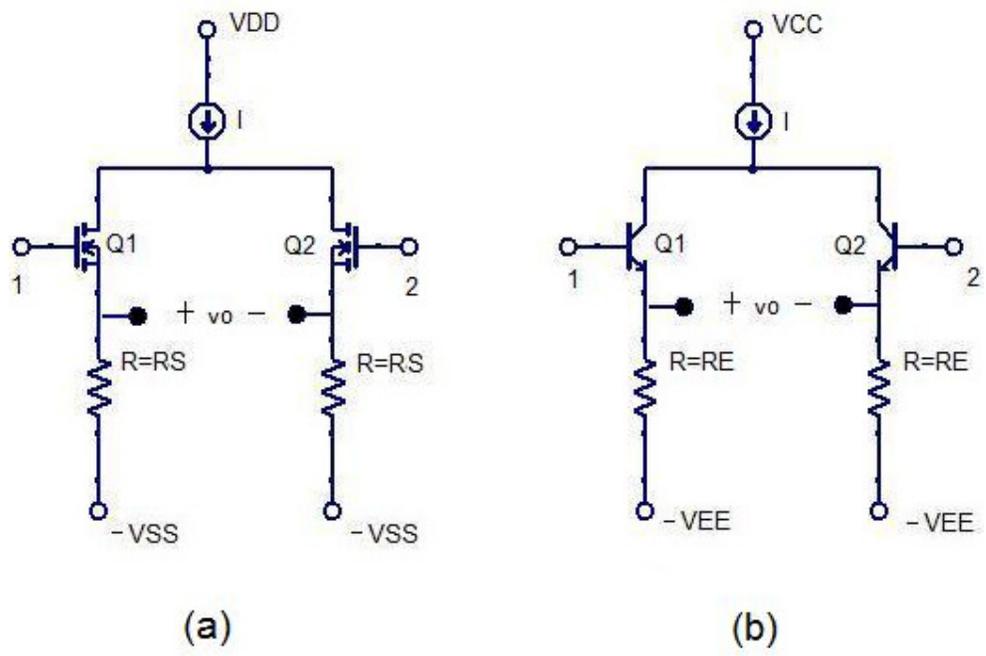


Fig.12

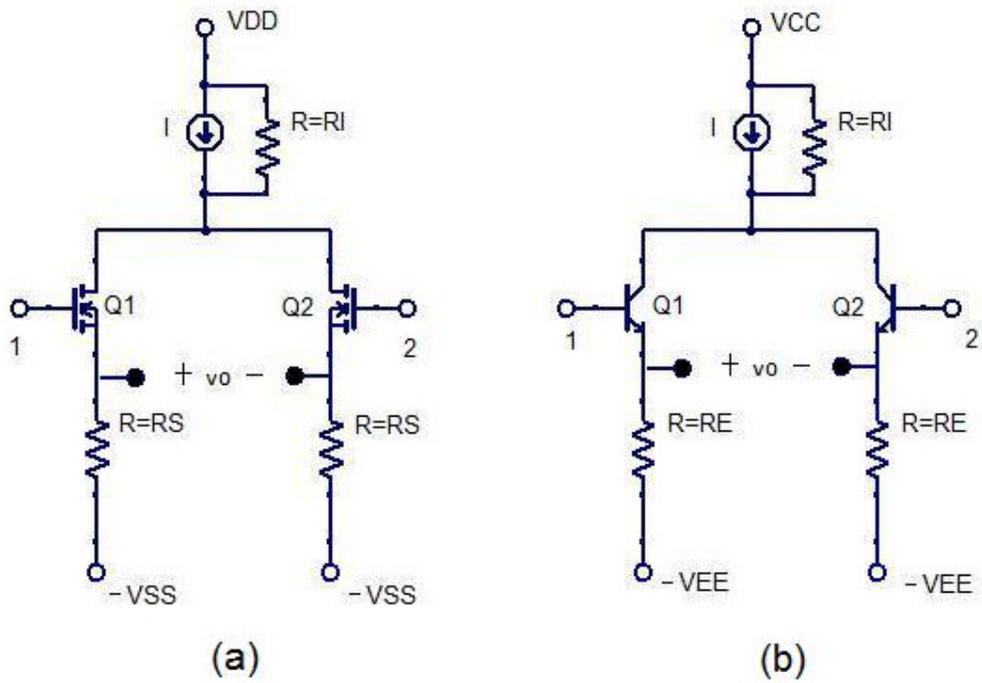


Fig.13

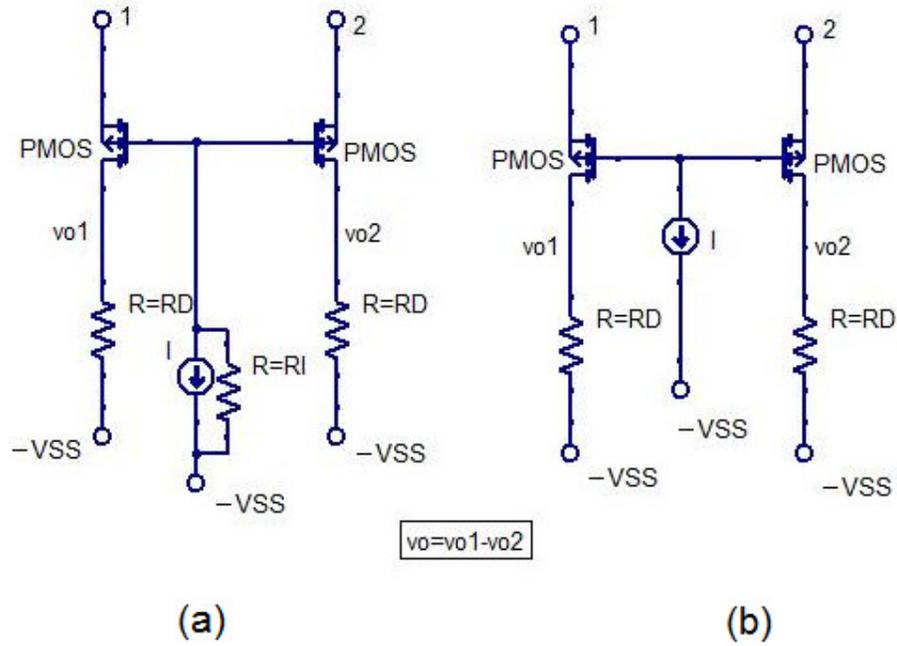


Fig.14

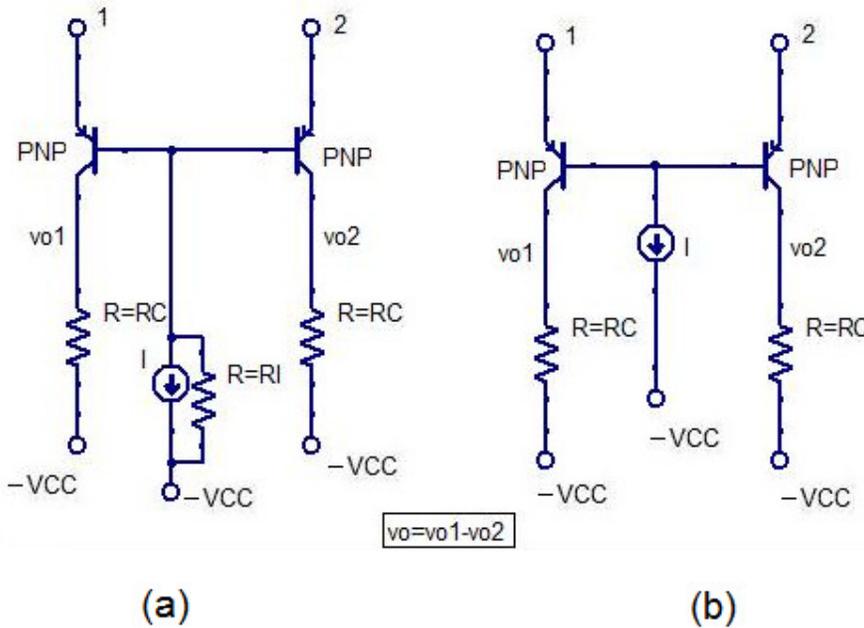


Fig.15

#### **Sugestão 1.4. Estágios de saída (com BJT)**

Para o estágio amplificador de saída em Classe A, mostrado na Fig. 16, aplica-se uma fonte de tensão na entrada ( $v_i$ ) de tal forma a: (I) garantir a operação do transistor sempre no modo ativo (nesse caso, assumir válidas, para o transistor, as equações:  $v_{BE}=0,7V$  e  $i_C=\beta i_B$ ); (II) produzir uma tensão de saída senoidal  $v_o=V_o \cdot \sin(\omega t)$ , onde  $V_o$  é o valor de pico. Considerando que  $I=(V_{CC}-v_{CE}^{sat})/R_L$ ,  $v_{CE}^{sat}=0,2V$  e que o valor de pico da tensão de saída é ajustável (pode-se mostrar que o transistor permanece no modo ativo se  $0 \leq V_o \leq (V_{CC}-v_{CE}^{sat})V$ ), pede-se:

- a) Obter as formas de onda para  $v_{CE}(t)$ ,  $i_C(t)$ ,  $i_o(t)$ ,  $v_i(t)$  e  $P_{DISS}=V_{CE}(t) \cdot i_C(t)$ .
- b) Obter uma expressão para o rendimento médio  $\eta(V_o)=P_{OUT}/P_{CC}$ , onde  $P_{OUT}$  é a potência entregue à carga e  $P_{CC}$  é a soma das potências CC fornecidas pelas fontes de tensão CC.
- c) Obter uma expressão para a potência média dissipada no transistor  $P_{DISS}(V_o)$ .
- d) Para  $V_{CC}=15V$  e  $R_L=14,8k\Omega$ , obter o rendimento médio ( $\eta$ ) e a  $P_{DISS}$  quando:
  - d1)  $V_o=0,25 \cdot (V_{CC}-v_{CE}^{sat})$ ;
  - d2)  $V_o=0,5 \cdot (V_{CC}-v_{CE}^{sat})$ ;
  - d3)  $V_o=0,75 \cdot (V_{CC}-v_{CE}^{sat})$ ;
  - d4)  $V_o=1 \cdot (V_{CC}-v_{CE}^{sat})$ .

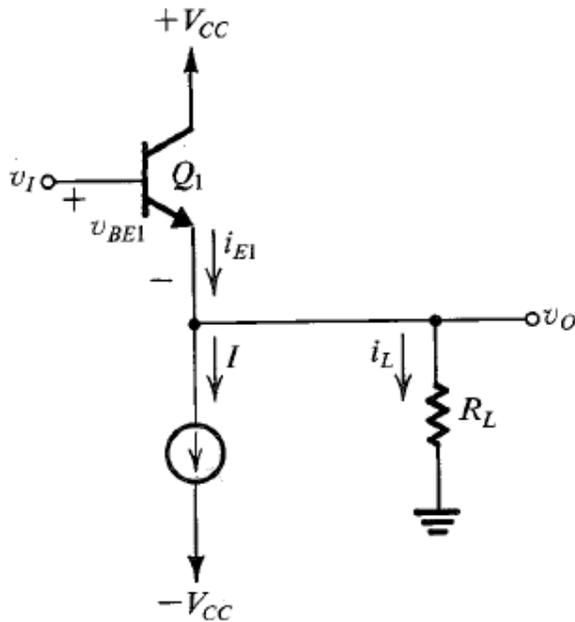


Fig.16

Para o estágio amplificador de saída em Classe A, mostrado na Fig. 17, aplica-se uma fonte de tensão na entrada ( $v_i$ ) de tal forma a: (I) garantir a operação do transistor sempre no modo ativo (nesse caso, assumir válidas, para o transistor, as equações:  $v_{BE}=0,7V$  e  $i_C=\beta i_B$ ); (II) produzir uma tensão de saída senoidal  $v_o=V_o \cdot \text{sen}(\omega t)$ , onde  $V_o$  é o valor de pico. Considerando que  $V_{CC}=15V$ ,  $I=1mA$ ,  $R_L=14k\Omega$ ,  $R=500\Omega$  e que o valor de pico da tensão de saída é ajustável (assumindo que em saturação  $v_{CE}^{sat}=0V$ , pode-se mostrar que o transistor permanece no modo ativo se  $0 \leq V_o \leq 14V$ ), pede-se:

a) Obter o rendimento médio ( $\eta$ ) e a  $P_{DISS}$  quando:

a1)  $V_o=5V$ ;

a2)  $V_o=10V$ ;

a3)  $V_o=14V$ .

b) Obter as formas de onda para  $v_{CE}(t)$ ,  $i_C(t)$ ,  $i_o(t)$ ,  $v_i(t)$  e  $p_{DISS}=v_{CE}(t) \cdot i_C(t)$ .

c) Obter uma expressão para o rendimento médio  $\eta(V_o)=P_{OUT}/P_{CC}$ , onde  $P_{OUT}$  é a potência entregue à carga e  $P_{CC}$  é a soma das potências CC fornecidas pelas fontes de tensão CC.

d) Obter uma expressão para a potência média dissipada no transistor  $P_{DISS}(V_o)$ .

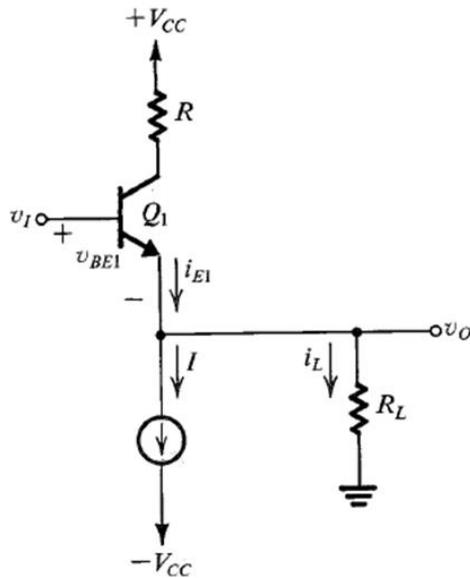


Fig.17

Para o estágio amplificador de saída em Classe B, mostrado na Fig. 18, aplica-se uma fonte de tensão na entrada  $v_I = V_I \cdot \text{sen}(\omega t)$ , de tal forma a garantir que nenhum dos transistores opere em saturação (ou seja, o valor de pico  $V_I$  é limitado; em particular, pode-se mostrar que nenhum dos transistores saturam se  $0 \leq v_O \leq (V_{CC} - v_{CE}^{\text{sat}})$  V). Assumindo que: (I) para um transistor BJT operando em modo ativo sejam válidas as equações:  $v_{BE} = 0,7\text{V}$  e  $i_C = \beta i_B$ ; (II) para um transistor BJT operando em corte (se  $v_{BE} \leq 0,7\text{V}$ ) sejam válidas as equações  $i_C = 0$  e  $i_B = 0$ , pede-se:

a) Obter as formas de onda para  $v_{CEN}(t)$ ,  $v_{CEP}(t)$ ,  $i_{CN}(t)$ ,  $i_{CP}(t)$ ,  $i_o(t)$ ,  $v_I(t)$  e  $p_{DISS}^{Q1} = v_{CEN}(t) \cdot i_{CN}(t)$ .

b) Obter uma expressão para o rendimento médio  $\eta(V_o) = P_{OUT} / P_{CC}$ , onde  $P_{OUT}$  é a potência entregue à carga e  $P_{CC}$  é a soma das potências CC fornecidas pelas fontes de tensão CC.

c) Obter uma expressão para a potência média dissipada nos transistores  $P_{DISS}^{Q1}(V_o) = P_{DISS}^{Q2}(V_o) = 1/2 * (P_{CC} - P_{OUT})$ .

Dicas para os itens b) e c): Desprezar a distorção de *crossover* e aproximar um sinal  $1/2$  onda retificada,  $s(t)$ , de valor de pico igual a S, pela seguinte série de Fourier truncada na fundamental:  $s(t) \approx S/\pi + S/2 \cdot \text{sen}(\omega t)$ .

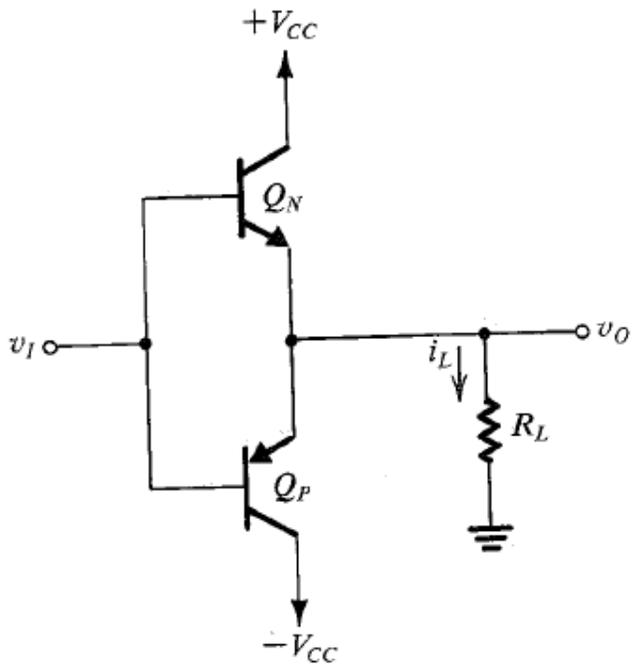


Fig.18