

PROCESSO SELETIVO – 04/2024

Área de Conhecimento: Eletrônica Analógica

PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA

QUESTÃO 1:

Livro Microeletrônica, Sedra/Smith a partir da quarta edição, Capítulo 5 envolvendo Polarização de Amplificadores MOS e Configurações Básicas de Amplificadores MOS em circuitos Integrados

- a) Qual a medida da largura do canal de Q2 e Q5 em relação aos outros transistores?

$$\frac{I_2}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} = \frac{5I_{REF}}{I_{REF}} \xrightarrow{\text{Resulta}} (W/L)_2 = 5(W/L)_1 \rightarrow W_2 = 5W_1$$

De forma semelhante para os transistores Q4 e Q5, considerando que a corrente no transistor Q1 é igual a corrente em Q3 e Q4, possuem a mesma razão W/L. Logo,

$$\frac{I_5}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_{4,1}} = \frac{2I_{REF}}{I_{REF}} \xrightarrow{\text{Resulta}} (W/L)_5 = 2(W/L)_{4,1} \rightarrow W_5 = 2W_{4,1}$$

- b) Para que o circuito se mantenha trabalhando efetivamente como espelho de corrente qual deverá ser  $V_{2\text{máx}}$ ? A expressão de  $V_{2\text{máx}}$  deve conter R e  $I_{REF}$ .

$$Q2 \text{ saturado, } V_{SG} > |V_{TP}| \text{ e } V_{SD} \leq V_{SG} - |V_{TP}|$$

$$\text{Ou seja, } -V_D \leq -V_G - |V_{TP}| \xrightarrow{\text{no limite}} V_D = V_G + |V_{TP}|$$

*com  $V_{G2} = V_{D1} = R \cdot I_{REF}$*

$$\text{Logo, } V_2 = R \cdot I_{REF} + |V_{TP}|$$

Membros da Banca:

---

Avaliador 1 Raimundo N G Robert

---

Avaliador 2 Pedro Bertemes Filho

---

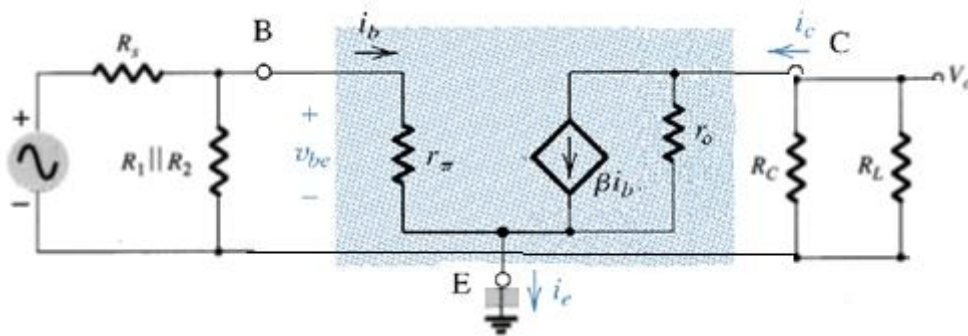
Avaliador 3 Joaquim Rangel Codeço

---

Presidente da Banca Raimundo N G Robert

QUESTÃO 2:

- 1- Livro Microeletrônica, Sedra/Smith a partir da quarta edição, Capítulo 4 envolvendo O Transistor como Amplificador, modelo pequenos sinais e Capítulo 7, Resposta em Frequência.
  - 2- Livro Eletrônica, Volume 1 – Albert Malvino/Davis J. Bates (7ª Edição), Capítulos 9 e 10, Modelos CA e Amplificadores de Tensão, respectivamente
- a) Determinar a expressão do ganho nas médias frequências.  
Modelo AC:



Modelo AC para as médias frequência (banda passante)

Obs.:  $r_\pi = \beta r_e$  e  $g_m V_\pi = \beta i_b$

$$R_i = \beta r_e = 2,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = R_1 // R_2 = (8 // 4) \text{ k}\Omega = 2,67 \text{ k}\Omega$$

$$Z_{in} = R_1 // R_2 // Z_b = (2,67 // 2,6) \text{ k}\Omega = 1,32 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = R_C // r_o = (6 // 100) \text{ k}\Omega = 5,66 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_C // R_L = (6 // 4) \text{ k}\Omega = 2,4 \text{ k}\Omega$$

$$\text{ganho} \rightarrow \begin{cases} v_o = -\beta i_b \times (r_o // R'_L) \\ \frac{v_b}{v_i} = \frac{Z_{in}}{R_s + Z_{in}} \\ v_b = V_\pi = \beta r_e i_b \end{cases} \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -\frac{Z_{in}}{R_s + Z_{in}} \times \frac{(r_o // R'_L)}{r_e}$$

- b) Obter/desenhar o diagrama da resposta em frequência (ganho de tensão x frequência), indicando no gráfico a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior, bem como a expressão das mesmas (frequência de corte inferior e superior). Considerar o efeito Muller no modelo de alta frequência para o transistor, capacitores  $C_\mu$  e  $C_\pi$ ;

**Frequência de corte inferior:** para obter a frequência de corte inferior, determina-se a resistência Thévenin a partir de cada capacitor de by-pass, ou seja,

$$C_S: f_S = \frac{1}{2\pi \times (R_S + Z_{in}) \times C_S}$$

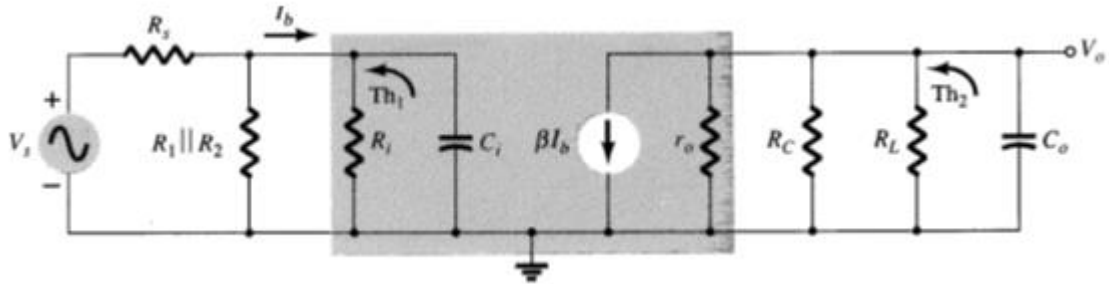
$$C_C: f_C = \frac{1}{2\pi \times (Z_o + R_L) \times C_C}$$

$$C_E: \begin{cases} R'_S = \frac{(R_S // R_B) + \beta r_e}{\beta} = \frac{(R_S // R_B)}{\beta} + r_e \\ f_E = \frac{1}{2\pi \times (R'_S // R_E) \times C_E} \end{cases}$$

$$f_i \cong f_E$$

$$\text{Melhor precisão: } f_i \cong \sqrt{f_S^2 + f_C^2 + f_E^2}$$

**Frequência de corte superior:** para obter a frequência de corte superior, capacitores de desvios em curto (alta frequência), utiliza-se o circuito simplificado ilustrado na figura abaixo a partir do modelo AC, definindo-se as capacitâncias de entrada e saída.



Circuito modificado para frequência de corte superior

$$C_i = C_\pi + C_{M_i} = C_\pi + (1 - A_v) \times C_\mu$$

$$C_o = C_{M_o} = \left(1 - \frac{1}{A_v}\right) \times C_\mu$$

$$C_i: f_{h_1} = \frac{1}{2\pi \times (R_S // Z_{in}) \times C_i}$$

$$C_o: f_{h_2} = \frac{1}{2\pi \times (Z_o // R_L) \times C_o}$$

$$\text{com } A_v = \frac{v_o}{v_b}$$

$f_h \cong f_{h_1}$  para a maioria dos casos, em função dos parâmetros do transistor.

- c) Explique como se obtém o valor do ganho da banda média para as frequências de corte inferior e superior.

Por definição, casos gerais, na frequência de corte inferior e superior o valor do ganho é igual ao ganho na banda média menos 3 dB ou o ganho na banda média dividido por raiz de 2. Assim sendo:

$$\frac{v_o}{v_i} = A = -\frac{Z_{in}}{R_S + Z_{in}} \times \frac{(r_o // R'_L)}{r_e}$$

*Nas frequências de corte inferior e superior:*

$$A_c = 0,707 \times A = -0,707 \frac{Z_{in}}{R_S + Z_{in}} \times \frac{(r_o // R'_L)}{r_e}$$

Levando em consideração o módulo, tem-se:  $0,707 \frac{Z_{in}}{R_S + Z_{in}} \times \frac{(r_o // R'_L)}{r_e}$

**Membros da Banca:**

---

**Avaliador 1 Raimundo N G Robert**

---

**Avaliador 2 Pedro Bertemes Filho**

---

**Avaliador 3 Joaquim Rangel Codeço**

---

**Presidente da Banca Raimundo N G Robert**

**PROCESSO SELETIVO – 04/2024**  
**Área de Conhecimento: Eletrônica Analógica**  
**PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA**

**QUESTÃO 3:**

1. Livro Microeletrônica, Sedra/Smith a partir da quarta edição, Capítulo 2 Amplificadores Operacionais.
2. Livro Eletrônica, Volume 2 – Albert Malvino/Davis J. Bates (7ª Edição), Capítulos 18, Amplificadores Operacionais.
3. Livro Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos, Antônio Pertence Júnior, 6ª Edição. Capítulos 2 – Realimentação Negativa e Capítulo 3 – Circuitos lineares básicos com Amplificadores Operacionais.

$$\begin{aligned} \text{Saída de } A_1: V_0' &= A_{d1}(V^+ - V^-) = A_{d1} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0 + V_{o1} \right) \\ V_0 &= A_{d2}(V_{o2} - V_0') = A_{d2}V_{o2} - A_{d2}A_{d1} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0 + V_{o1} \right) \\ V_0 \left( 1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_{d2}A_{d1} \right) &= A_{d2}V_{o2} - A_{d2}A_{d1}V_{o1} = A_{d2}(V_{o2} - A_{d1}V_{o1}) \\ V_0 &= \frac{(R_1 + R_2)A_{d2}(V_{o2} - A_{d1}V_{o1})}{R_2 + R_1(1 + A_{d2}A_{d1})} = \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{A_{d2}(V_{o2} - A_{d1}V_{o1})}{\frac{R_1}{R_2}(1 + A_{d2}A_{d1})} \\ V_0 &= \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{R_2}{R_1} \left[ \frac{A_{d2}(V_{o2} - A_{d1}V_{o1})}{1 + A_{d2}A_{d1}} \right]_{A_{d2}A_{d1} \gg 1} = \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{V_{o2}}{A_{d1}} - V_{o1} \right) \\ \text{ou ainda: } V_0 &= - \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{R_2}{R_1} V_{o1} = - \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) V_{o1} \end{aligned}$$

Obs:  $V_{os1} = V_{o1}$  e  $V_{os2} = V_{o2}$  na solução acima, escolha de A1 de alto desempenho.

**Membros da Banca:**

---

**Avaliador 1 Raimundo N G Robert**

---

**Avaliador 2 Pedro Bertemes Filho**

---

**Avaliador 3 Joaquim Rangel Codeço**

---

**Presidente da Banca Raimundo N G Robert**

PROCESSO SELETIVO – 04/2024  
Área de Conhecimento: Eletrônica Analógica  
PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA

QUESTÃO 4:

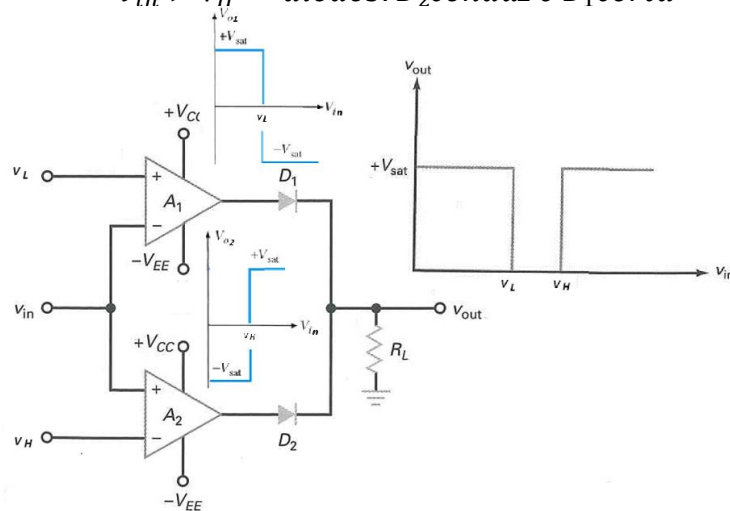
- 1- Livro Eletrônica, Volume 2 – Albert Malvino/Davis J. Bates (7ª Edição), Capítulos 22, Circuitos não Lineares com Amplificadores Operacionais, comparador janela, página 300.
- 2- Livro Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos, Antônio Pertence Júnior, 6ª Edição. Capítulos 5 – Aplicações não Lineares com Amplificadores Operacionais.

Trata-se da característica de transferência do circuito comparador janela inversa, implementado com dois amplificadores operacionais. O Amplificador operacional  $A_1$  é responsável pelo limite inferior, ou seja,  $A_1$  funciona como um comparador inversor e  $A_2$  como um comparador não inversor, limite superior. Com a condução dos diodos, resultando na característica desejada. Considerando  $A_1, A_2, D_1$  e  $D_2$  ideais.

$$v_{in} < V_L \rightarrow \text{diodos: } D_1 \text{ conduz e } D_2 \text{ corta}$$

$$V_H > v_{in} > V_L \rightarrow \text{diodos: } D_1 \text{ e } D_2 \text{ cortados}$$

$$v_{in} > V_H \rightarrow \text{diodos: } D_2 \text{ conduz e } D_1 \text{ corta}$$



Membros da Banca:

Avaliador 1 Raimundo N G Robert

Avaliador 2 Pedro Bertemes Filho

Avaliador 3 Joaquim Rangel Codeço

Presidente da Banca Raimundo N G Robert



# Assinaturas do documento



Código para verificação: **E4U69I5T**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:

✓ **RAIMUNDO NONATO GONCALVES ROBERT** (CPF: 157.XXX.772-XX) em 24/06/2024 às 12:34:06  
Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:38:42 e válido até 30/03/2118 - 12:38:42.  
(Assinatura do sistema)

✓ **PEDRO BERTEMES FILHO** (CPF: 821.XXX.809-XX) em 24/06/2024 às 12:42:32  
Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:35:56 e válido até 30/03/2118 - 12:35:56.  
(Assinatura do sistema)

✓ **JOAQUIM RANGEL CODECO** (CPF: 501.XXX.367-XX) em 24/06/2024 às 13:23:37  
Emitido por: "SGP-e", emitido em 09/05/2019 - 17:57:39 e válido até 09/05/2119 - 17:57:39.  
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTlwMjJfMDAwMjU0ODVfMjU1MjJfMjAyNF9FNjU2OUk1VA==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00025485/2024** e o código **E4U69I5T** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.