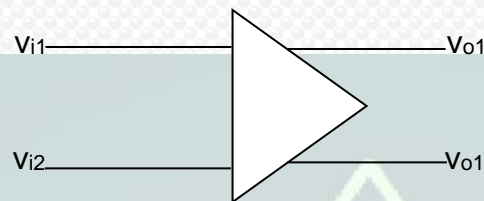


MÓDULO 8: INTRODUÇÃO AO AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

Introdução: O amplificador diferencial é um bloco pertencente aos circuitos analógicos ou lineares com o qual é construído o amplificador operacional. Sendo um circuito que tem altíssimo ganho e muito alta impedância de entrada. Os estágios de entrada com os amplificadores diferenciais são estudados quanto ao: ganho diferencial, ganho em modo comum, taxa de rejeição de modo comum, resistência diferencial de entrada. Os amplificadores diferenciais são mostrados a seguir como um bloco triangular com duas entradas e duas saídas.

Bloco amplificador diferencial



Serão estudados quatro casos combinando os sinais de entrada aplicados às entradas do amplificador diferencial e analisando às saídas.

Caso 1: $V_{i2} = 0 \Rightarrow V_{o1} = -A_{DM} \cdot V_{i1}$, $V_{o2} = +A_{DM} \cdot V_{i1}$ e $V_{o1} - V_{o2} = -2 \cdot A_{DM} \cdot V_{i1}$.

Caso 2: $V_{i1} = 0 \Rightarrow V_{o1} = +A_{DM} \cdot V_{i2}$, $V_{o2} = -A_{DM} \cdot V_{i2}$ e $V_{o1} - V_{o2} = +2 \cdot A_{DM} \cdot V_{i2}$.

Caso 3: $V_{i1} = V_{i2} \Rightarrow V_{o1} = 0$, $V_{o2} = 0$ e $V_{o1} - V_{o2} = 0$.

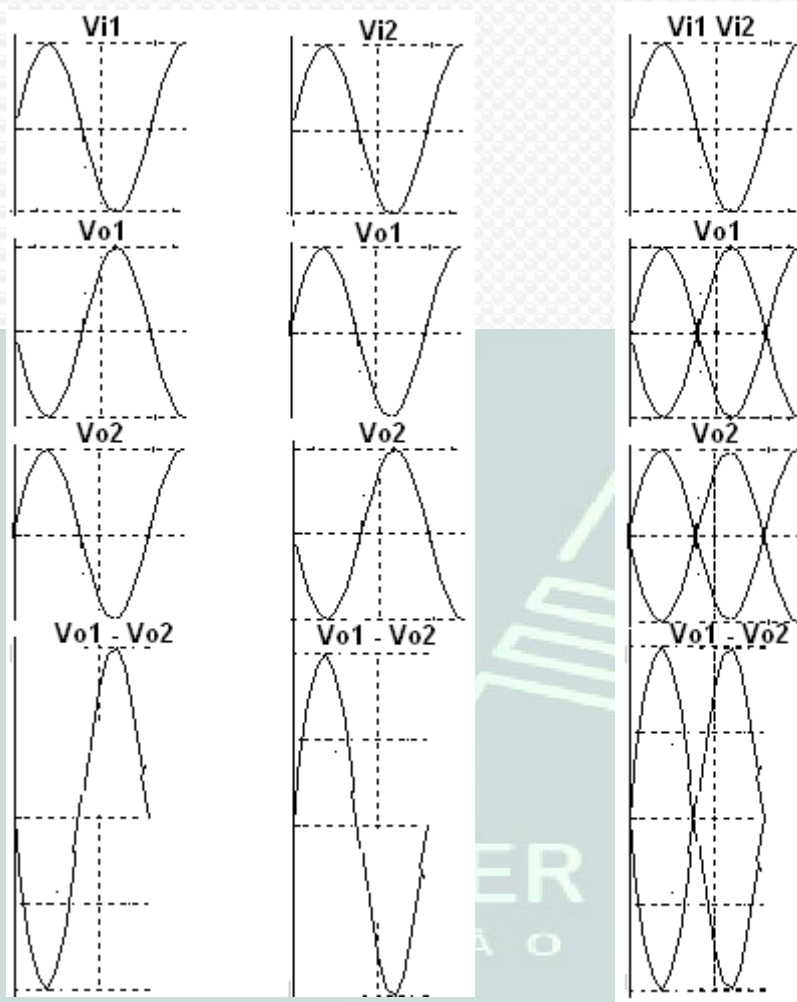
Caso 4: $V_{i1} = -V_{i2} = 2 \cdot V_{i(1,2)} \Rightarrow V_{o1} = -2A_{DM} \cdot V_{i1}$, $V_{o2} = 2A_{DM} \cdot V_{i2}$ e $V_{o1} - V_{o2} = -4 \cdot A_{DM} \cdot V_{i(1,2)}$.

Caso 1: Sinal em v_{i1}
Entrada aterrada v_{i2} .

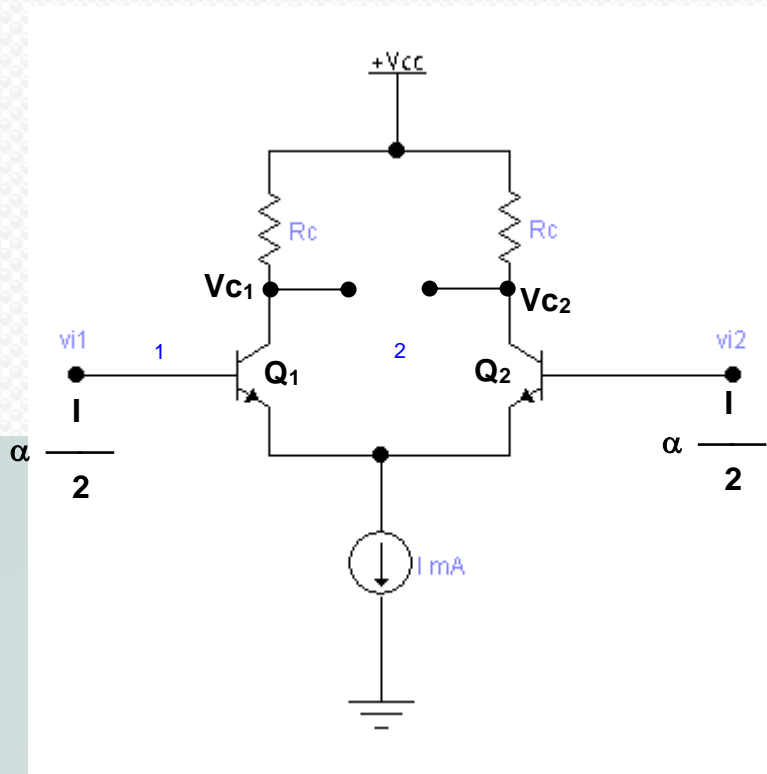
Caso 2: Sinal em v_{i2}
Entrada aterrada v_{i1} .

Caso 3: $v_{i1} = v_{i2}$

Caso 4: $v_{i1} = -v_{i2}$

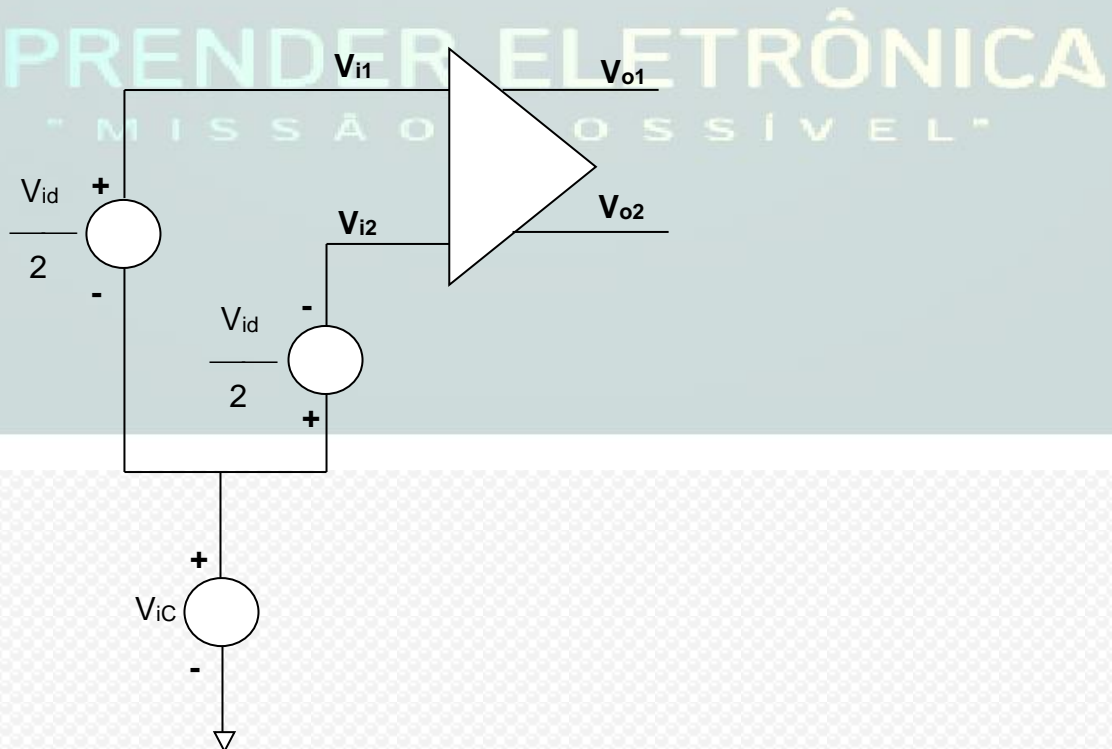


O circuito realizado com um par casado de transistores de junção é mostrado na figura a seguir.



I - Análise de sinais *modo diferencial e comum*.

1. Do circuito, temos:



II - DIFERENÇA ENTRE MODO DIFERENCIAL E MODO COMUM

$$V_{i1} = V_{ic} + \frac{V_{id}}{2} \text{ e } V_{i2} = V_{ic} - \frac{V_{id}}{2}, (1)$$

Então:

a) Modo Diferencial

Da equação (1), temos:

$$V_{ic} = V_{i1} - \frac{V_{id}}{2} \text{ e } V_{ic} = V_{i2} + \frac{V_{id}}{2}, \text{ daí, temos:}$$

$$V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$$

b) Modo Comum

Da equação (1), temos:

$$V_{id} = 2V_{i1} - 2V_{ic} \text{ e } V_{id} = -2V_{i2} + 2V_{ic}, \text{ temos:}$$

$$2V_{i1} - 2V_{ic} = -2V_{i2} + 2V_{ic}$$

$$2(V_{i1} + V_{i2}) = 4V_{ic}, \text{ então:}$$

$$V_{ic} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}$$

Similarmente para a saída, temos:

$$V_{o1} = V_{oc} + \frac{V_{od}}{2} \text{ e } V_{o2} = V_{oc} - \frac{V_{od}}{2}, (2)$$

Então :

a) Modo Diferencial

Da equação (2), temos:

$$V_{oc} = V_{o1} - \frac{V_{od}}{2} \text{ e } V_{oc} = V_{o2} + \frac{V_{od}}{2}, \text{ daí, temos:}$$

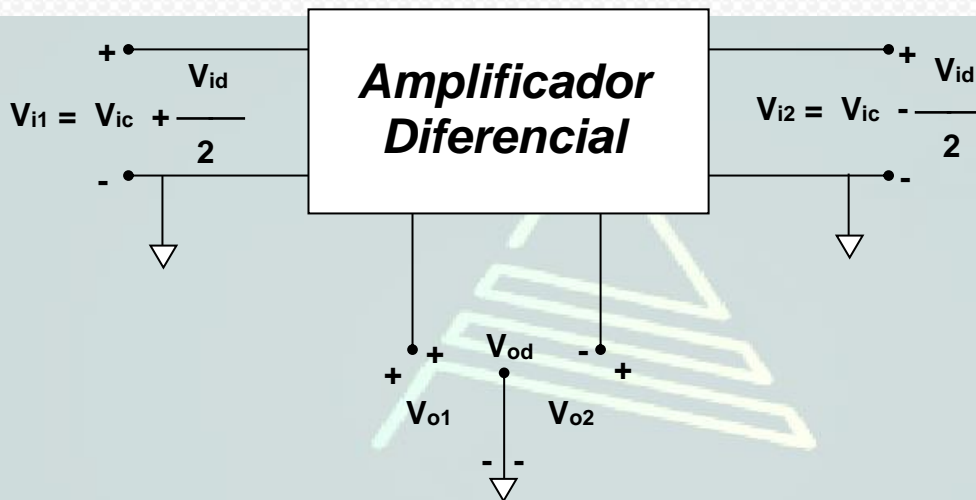
$$V_{od} = (V_{o1} - V_{o2})_{\text{diferencial}}$$

b) Modo Comum

Da equação (2), temos:

$$V_{od} = (V_{o1} - V_{o2})_{\text{comum}}$$

III - ANÁLISE INCREMENTAL DO AMPLIFICADOR DIFERENCIAL



IV – Ganhos do Amplificador Diferencial

a) Modo Diferencial

$$A_{DM} = \frac{V_{od}}{V_{id}}$$

b) Modo Comum

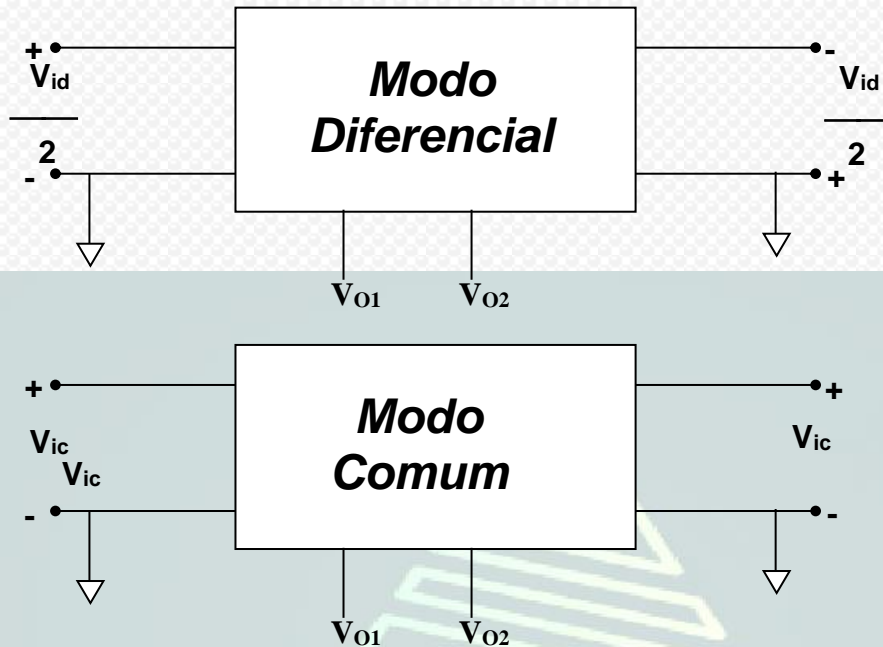
$$A_{CM} = \frac{V_{oc}}{V_{ic}}$$

c) Taxa de Rejeição a sinais de modo comum.

$$CMRR = \frac{A_{DM}}{A_{CM}}$$

V - ANÁLISE DA SAÍDA NO GANHO DIFERENCIAL E COMUM.

1 – Use superposição e quebre o circuito em 02 problemas, como a seguir:



Ganho de Modo diferencial, será:

$$A_{DM} = \frac{V_{O2} - V_{O1}}{V_{i1} - V_{i2}} \text{ e } V_{O1} = -V_{O2}$$

$$A_{DM} = \frac{2 \cdot V_{O1}}{V_{id}}, \text{ onde } V_{i1} = -V_{i2} = \frac{V_{id}}{2}, \text{ assim:}$$

$$A_{DM} = \frac{V_{O1}}{V_{id}/2}$$

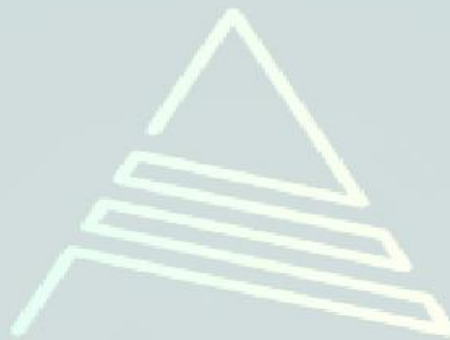
Ganho de Modo Comum, será:

$$A_{CM} = \frac{V_{O1MC} - V_{O2MC}}{V_{ic}},$$

$$A_{CM} = \frac{V_{O1MC}}{V_{ic}} \text{ (simples)}$$



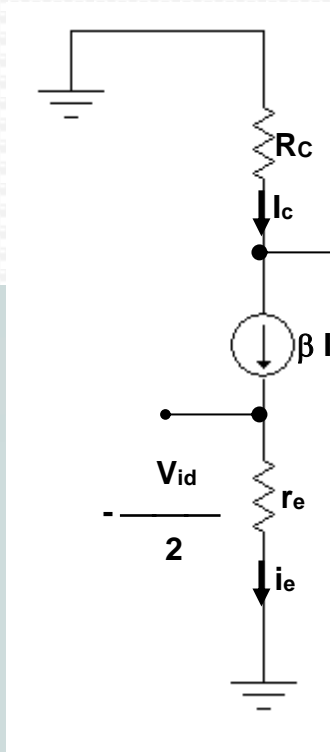
Circuitos Eletrônicos



APRENDER ELETRÔNICA
"MISSÃO POSSÍVEL"

VI - ANÁLISE CA DOS AMPLIFICADORES DIFERENCIAIS

a) Modo Diferencial



Do circuito podemos tirar :

$$\text{A corrente } I_e = -\frac{V_{id}}{2 \cdot r_e} \text{ e } V_{OUT} = -I_c \cdot R_C,$$

$$\text{como } I_c = \alpha \cdot I_e \text{ e } \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}, \text{ temos :}$$

$$I_c = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{-V_{id}}{2 \cdot r_e} \text{ daí,}$$

$$V_{OUT} = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{-V_{id}}{2 \cdot r_e} R_C,$$

$$\text{Como } A_{DM} = \frac{-V_{OUT}}{V_{id}}, \text{ teremos :}$$

$$A_{DM} = \frac{-\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{R_C}{2 \cdot r_e}$$

b) Modo Comum

Do circuito podemos tirar :

$$\text{A corrente } I_e = \frac{V_{ic}}{r_e + 2R_E} \text{ e } V_{OUT} = -I_c \cdot R_C,$$

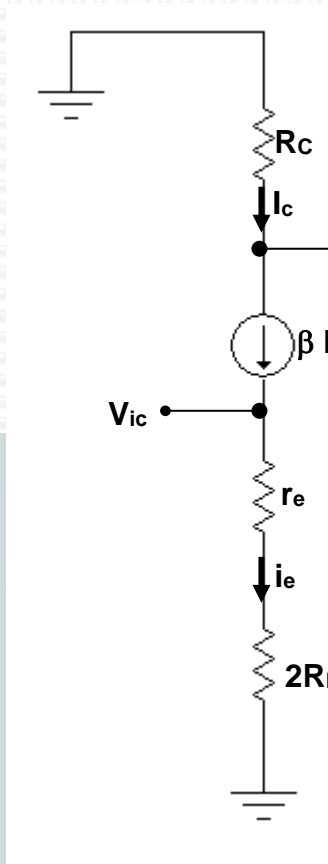
$$\text{como } I_c = \alpha \cdot I_e \text{ e } \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}, \text{ temos :}$$

$$I_c = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{V_{ic}}{r_e + 2R_E} \text{ daí,}$$

$$V_{OUT} = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{V_{ic}}{r_e + 2R_E} R_C.$$

$$\text{Como } A_{CM} = \frac{V_{OUT}}{V_{ic}}, \text{ teremos: Como } R_E + r_e \Rightarrow R_E$$

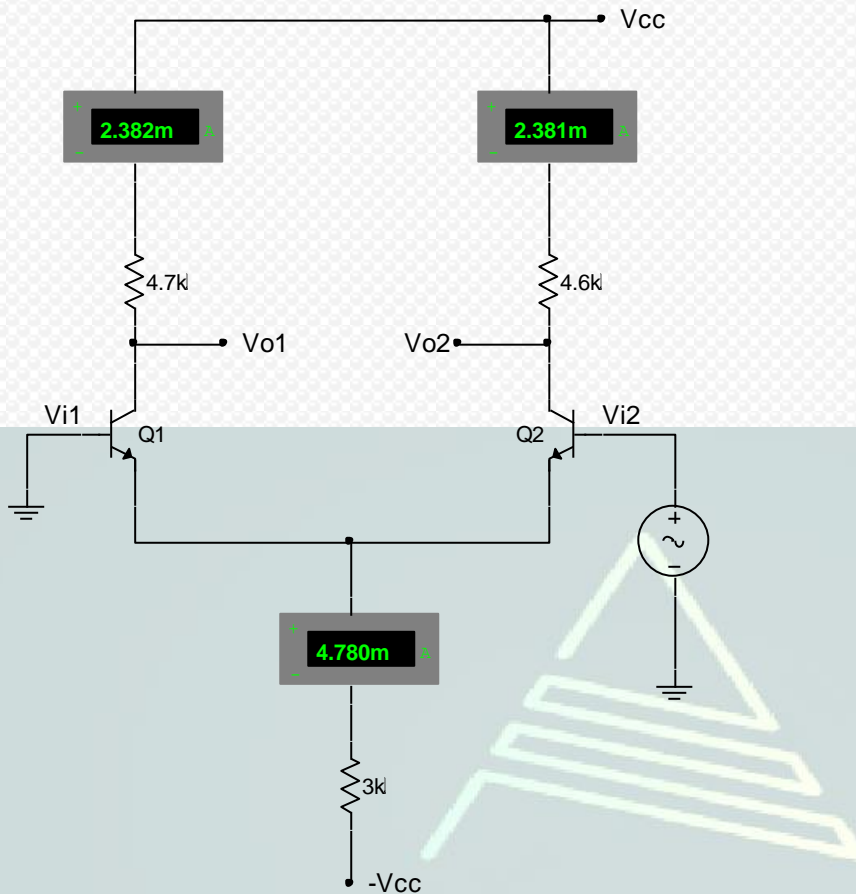
$$A_{CM} = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{R_C}{2R_E}$$



EXEMPLO: Para o amplificador diferencial, conforme abaixo, determinar:

- A corrente C.C que circula no resistor de emissores dos tansistores.
- A corrente de coletor em cada transistor.
- A tensão de coletor e emissor de cada transistor.
- O ganho de modo diferencial e de modo simples e duplo de cada transistor.
- A taxa de rejeição em modo comum em dB.

Dados: $V_{CC} = \pm 15V$, $V_{BE} = 0,66V$.



a) A corrente de emissor será:

$$V_E = -V_{BE} = -0,66V \text{ e } I_E = [-0,66 - (-V_{CC})] / 3K = 4,78mA$$

b) A corrente de coletor será:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_E / 2 = 2,39mA.$$

$$c) V_{CE1} = V_{CE2} = (V_{CC} - R_C \cdot I_C) - (V_E) = 15 - 4,7K \cdot 2,39mA - (-0,66) = 4,43V.$$

d) O ganho diferencial modo simples será:

$$A_{DMS} = -gmR_C / 2 \Rightarrow r_e = 26mV / 2,39mA = 10,9 \therefore gm = 1/r_e = 92 \cdot 10^{-3}.$$

$$A_{DMS} = -92 \times 10^{-3} \times 4700 / 2 \cong -216 \text{ e } A_{DMD} = -432.$$

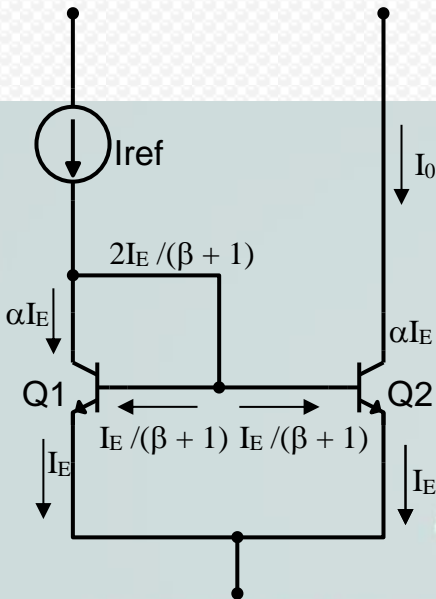
$$A_{CMS} = R_C / 2R_E = -4700 / 2 \cdot 3000 = 0,78.$$

$$e) CMRR = 20 \log A_{DMS} / A_{CMS} = 20 \log 216 / 0,78 = 48,8dB.$$

VIII – ACOPLAMENTO EMISSOR COM FONTE DE CORRENTE CONSTANTE

Colocando-se uma fonte de corrente acoplada ao emissor, não deverá alterar o ganho de modo diferencial, como mostrado a seguir.

a. ESPELHO DE CORRENTE – Uma fonte de corrente constante e simples com transistor bipolar é apresentada a seguir.



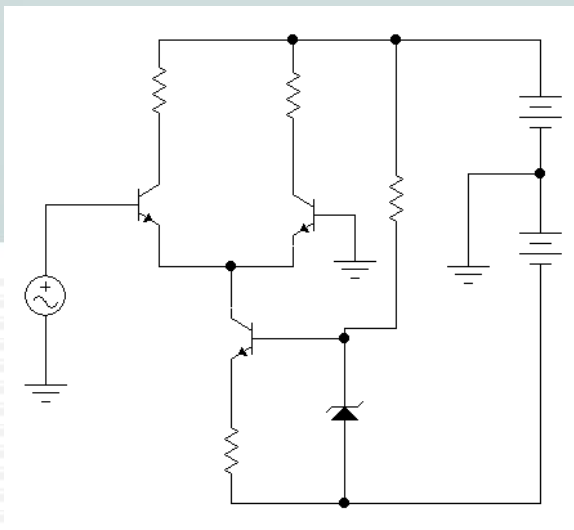
O espelho de corrente é formado por dois transistores Q_1 e Q_2 com as bases e emissores conectados em comum. A razão disso é que as tensões de v_{be} serão as mesmas. O transistor Q_1 é conectado como um diodo base e coletor comum. A proposta é que a fonte de corrente colocada no coletor de Q_1 , a corrente constante I_{REF} e a corrente que passa pelo emissor de Q_2 é a mesma.

$$I_{REF} = I_E \left[\frac{\beta}{\beta + 1} + \frac{2}{\beta + 1} \right] = I_E \frac{(\beta + 2)}{(\beta + 1)}$$

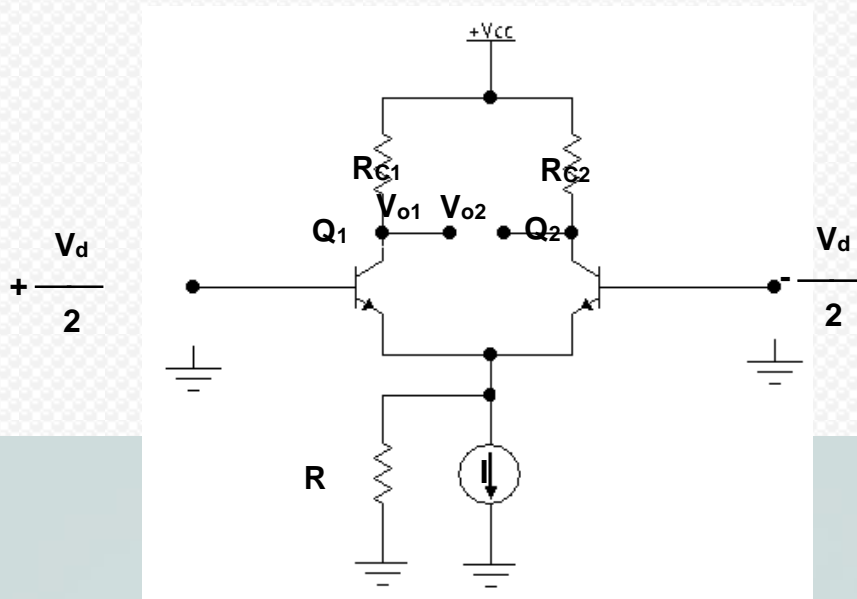
$$I_0 / I_{REF} = \beta / (\beta + 2) \text{ que é praticamente igual a 1 quando } \beta \gg 1.$$

GANHO MODO DIFERENCIAL ACOPLAMENTO EMISSOR COM FONTE DE CORRENTE CONSTANTE.

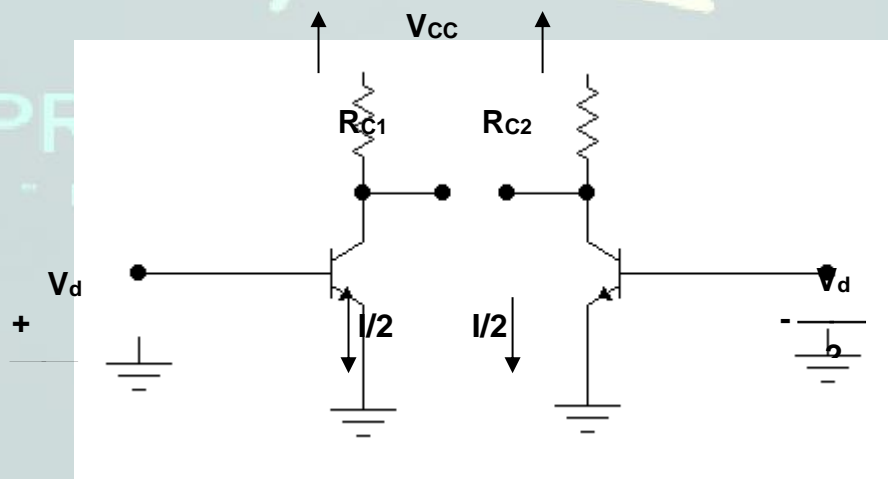
Considere o circuito a seguir.



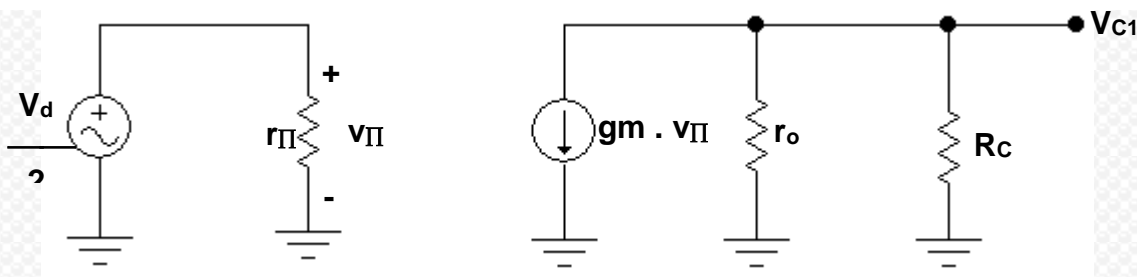
Análise AC do circuito, temos o seguinte modelo.



Para sinais AC, as fontes de tensão e de corrente são nulas.



O modelo de circuito equivalente do meio circuito diferencial.



O ganho diferencial será : $A_{DMD} = - gm \cdot (R_C // r_o)$.

A resistência diferencial de entrada = $2 \cdot r_{\pi}$.

A Taxa de rejeição de modo comum, será:

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_{DM}}{A_{CM}} \right| = \text{gm} \cdot R \quad \text{com } \alpha = 1$$

Como CMRR é uma expressão em dB, temos:

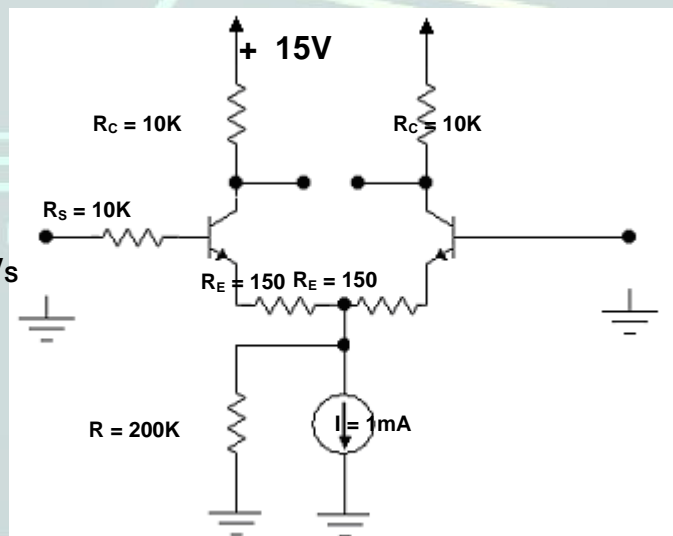
$$\text{CMRR} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_{CM}} \right|$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

O amplificador a seguir possui 2 transistores com $\beta = 100$. Determinar:

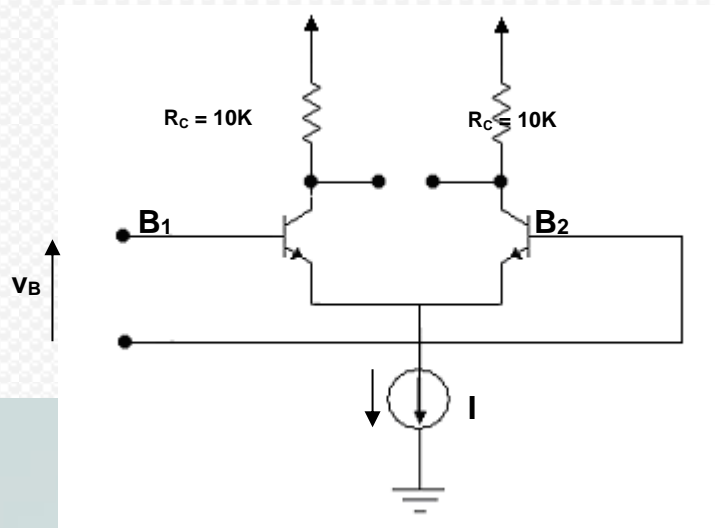
- A resistência diferencial de entrada.
- O ganho total v_0 / v_s , desprezando-se r_0 .
- O ganho em modo comum para o pior caso se as 2 resistências de coletor tiverem uma precisão de $\pm 1\%$.

Dados : $R = 200\text{K}$, $V_{CC} = +15\text{V}$, $R_C = 10\text{K}$, $I = 1\text{mA}$. e $R_S = 10\text{K}$, sendo $B_2 = 0$.



EXERCÍCIO PROPOSTO: No circuito a seguir suponha $I = 1\text{mA}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, $R = 200\text{K}$, $R_C = 10\text{K}$ e $\alpha = 1$ e suponha que as tensões sejam $v_{B1} = 0,005 \text{ sen}2\pi 1000t$ Volts e $v_{B2} = -0,005 \text{ sen}2\pi \times 1000t$ Volts. Se os TJBs são especificados com $v_{BE} = 0,7\text{V}$, determinar:

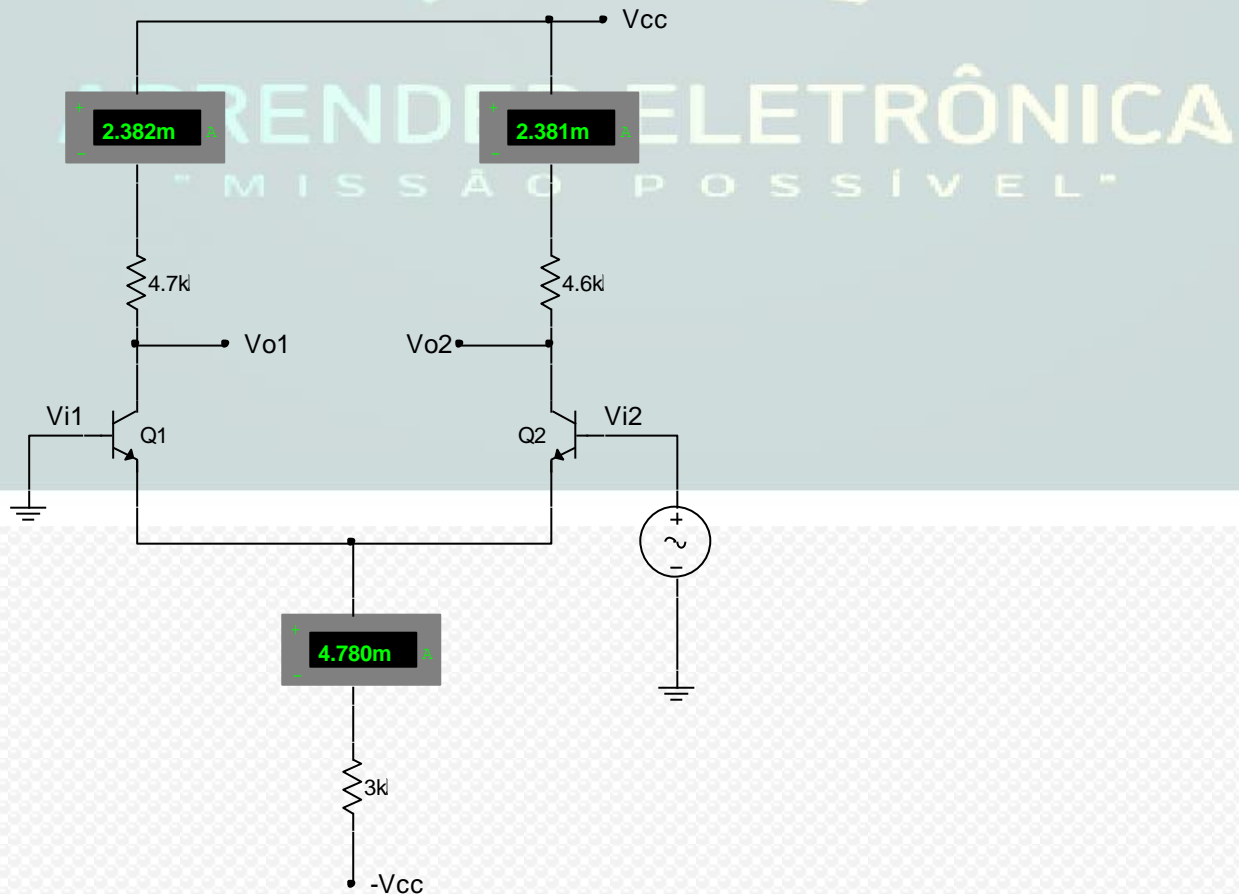
- A tensão nos emissores;
- Determinar gm para os 02 transistores;
- A corrente i_C de cada um dos transistores;
- A tensão V_C no coletor de cada um dos transistores;
- A tensão entre os 02 coletores;
- O ganho modo diferencial simples e duplo.
- O ganho de modo comum simples e duplo.
- A taxa em dB de rejeição de modo comum.



Respostas : a) $-0,7V$; b) $20mA/V$ c) $i_{C1} = 0,5mA$ e $i_{C2} = 0,5mA$; d) $v_{C1} = 10V$ e $v_{C2} = 10V$; e) $v_{C2} - v_{C1} = 0V$; f) $-200V/V$, g) $-25mV/V$ e h) $78dB$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

As questões de 1 a 4 referem-se aos dados e figura a seguir: Dados $V_{CC} = \pm 24V$





Circuitos Eletrônicos

1.o Exercício: As tensões CC em V_{O1} e V_{O2} .

- a) $V_{O1} = V_{O2} = 12,80V$
- b) $V_{O1} = V_{O2} = 10,80V$
- c) $V_{O1} = V_{O2} = 9,80V$
- d) $V_{O1} = V_{O2} = 11,80V$
- e) $V_{O1} = V_{O2} = 13,80V$

Resposta: a

2.o Exercício: A tensão nos emissores dos transistores em relação ao terra, sabendo-se que $V_{BE} = 0,6$.

- a) $V_E = 0V$
- b) $V_E = -1,0V$
- c) $V_E = -0,6V$
- d) $V_E = +0,6V$
- e) $V_E = +1,0V$

Resposta: c

3.o Exercício: Dado $g_m = 0,1S$ determinar o ganho diferencial do circuito

- a) $A_V = -470$
- b) $A_V = -230$
- c) $A_V = -100$
- d) $A_V = -235$
- e) $A_V = -245$

Resposta: d

4.o Exercício: Dado $g_m = 0,1S$ determinar a saída em V_{O1} e V_{O2} para um sinal de entrada de $10mV_P$.

- a) $V_{O1} = V_{O2} = -2,35V$
- b) $V_{O1} = +2,35V$ e $V_{O2} = -2,35V$
- c) $V_{O1} = +4,70V$ e $V_{O2} = -4,70V$
- d) $V_{O1} = -4,70V$ e $V_{O2} = +4,70V$
- e) $V_{O1} = -2,35V$ e $V_{O2} = +2,35V$

Resposta: e

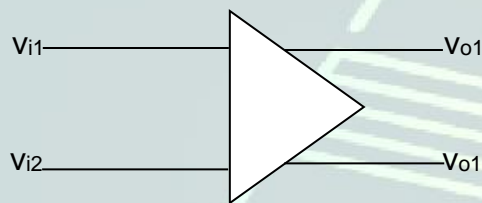
5.o Exercício: Indique qual das afirmativas está correta.

- a) O espelho de corrente é um circuito que opera com transistores conectados com as bases e emissores em comum para que V_{BE} dos transistores sejam iguais, onde a fonte de corrente constante aplicada ao coletor de um dos transistores implicará na mesma corrente de emissor no segundo transistor.

- b) O espelho de corrente é um circuito que opera com transistores conectados com as bases e emissores em comum para que V_{BE} dos transistores sejam diferentes, onde a fonte de corrente constante aplicada ao coletor de um dos transistores implicará na mesma corrente de emissor no segundo transistor.
- c) O espelho de corrente é um circuito que opera com transistores conectados com as bases e emissores em comum para que V_{BE} dos transistores sejam iguais, onde a fonte de corrente constante aplicada ao coletor de um dos transistores não implicará na mesma corrente de emissor no segundo transistor.
- d) O espelho de corrente não pode ser utilizado nos circuitos integrados, pois é difícil obter o casamento das tensões V_{BE} .
- e) O espelho de corrente não pode ser utilizado nos circuitos integrados, mas é fácil obter o casamento das tensões V_{BE} .

Resposta: a

Os exercícios de 6 a 8 referem-se aos dados e figura a seguir.



6.o Exercício: Para o amplificador diferencial, podemos afirmar:

- a) A tensão de saída é função do ganho de modo diferencial somente
- b) A tensão de saída é função do ganho de modo diferencial e de modo comum
- c) O ganho de modo comum é igual a zero
- d) A taxa CMRR é a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada
- e) Quanto maior é a taxa de rejeição de modo comum maior o ganho de modo comum

Resposta: b

7.o Exercício: Para o amplificador diferencial, podemos afirmar:

- a) A taxa de rejeição de modo comum é a relação entre o ganho de modo diferencial e o ganho de modo comum
- b) Quanto menor a resistência acoplada aos emissores do circuito amplificador maior será o ganho de modo comum.
- c) Para tensões iguais aplicadas às entradas diferenciais as saídas serão iguais a zero.
- d) Para tensões complementares aplicadas as entradas diferenciais as saídas serão iguais a zero.
- e) Não é possível instalar uma fonte de corrente aos emissores dos transistores, pois aumenta o ganho de modo comum

Resposta: a

8.o Exercício: Para o amplificador diferencial, podemos afirmar:

- a) O ganho nas saídas diferenciais é sempre igual e de mesmo sinal.



Circuitos Eletrônicos

- b) O ganho do amplificador diferencial é beta do transistor vezes a tensão aplicada na entrada.
- c) Quanto maior a taxa CMRR, a saída se aproxima da tensão no modo comum.
- d) A saída é igual a zero quando o ganho de modo comum for zero.
- e) Aplicando uma fonte de corrente aos emissores dos transistores, aumenta o CMRR, pois diminui o ganho de modo comum

Resposta: e

BIBLIOGRAFIA

Referência: **Livro Texto: Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.**

Autores: Robert Boylestad e Louis Nashelsky, editora Pearson, Prentice Hall, 11.a edição, ano 2013.

OUTRAS REFERÊNCIAS

1. Microeletrônica – Sedra, A.S e Smith, K,C – 5.a edição Pearson.
2. Eletrônica Vol.1 – Malvino, A.P – 14.a edição, Editora Makron,
3. Circuitos Elétricos - Nilsson, J. W. / Riedel, S. A. / Marques, A. S., ano de 2008 Prentice Hall Brasil.
4. Circuitos com transistores Bipolares e MOS - Silva, M. M./Calouste, G., ano de 2010.
5. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.1 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.
6. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos, V.2 – Bogart, J. - ano de 2000 - Editora MAKRON.

APRENDER ELETRÔNICA
"MISSÃO POSSÍVEL"