

CORRENTES DE POLARIZAÇÃO E OFFSET DE CORRENTE

Consideramos antes, por parte um amp. op. ideal, $I_m = I_p = 0$.
 Para um amp. op. real, $I_p \neq 0$, $I_m \neq 0$ e $I_p \neq I_m$.

Isso está relacionado à necessidade de os transistores de entrada de estarem polarizados na região ativa e de que o casamento entre eles não é perfeito. A condição acima é tratada como um "defeito c.c." do amp. op.

Definiremos:

$$I_B \triangleq \frac{I_p + I_m}{2} \quad \text{corrente de polarização de entrada,}$$

tipicamente com valores entre $0,1 \mu A$ e $10 \mu A$, podendo ser positiva ou negativa, dependendo do tipo de amp. op.

$$I_{EO} \triangleq I_p - I_m \quad \text{offset de correntes de entrada,}$$

expresso em %, tipicamente de 5 a 10%
 (I_{EO} ou I_{OS})

Dependendo dos valores de I_p e I_m , o erro no sinal de saída pode ser muito significativo.

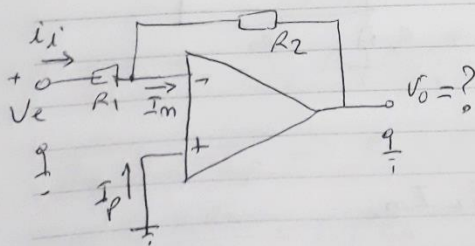
Ex.: Amplificador inversor.

$$I_p = I_m = 100 \text{ nA}$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

Operando na região linear: $V_d \approx 0$



Se $v_e = 0$ e $v_m = 0$ (tensão virtual)

$$\Rightarrow v_{R_1} = 0 \text{ e } i_i = 0$$

I_m passará através de R_2 e $i_2 \Big|_{v_e=0} = I_m$.

$$\therefore v_o \Big|_{v_e=0} = R_2 I_m$$

I_p flui diretamente para a massa e não afeta o valor de v_o .

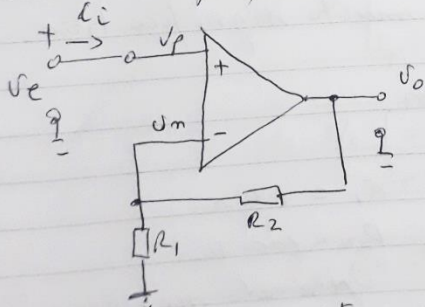
Para o sinal: $v_{o, \text{ sinal}} = -\frac{R_2}{R_1} v_e$.

$$\therefore v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_e + R_2 I_m$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega \text{ e } R_1 = 1 \text{ k}\Omega \Rightarrow$$

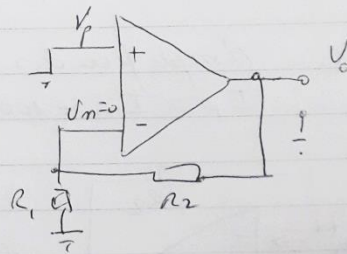
$$v_o = -100 v_e + 100 \text{ k} \times 100 \text{ n} = -100 v_e + 10 \text{ mV}$$

Ex.: Amplificador não inversor



$$\text{Se } v_e = 0 \Rightarrow v_p = 0$$

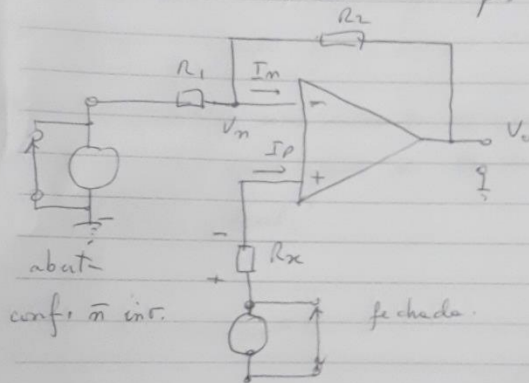
$$\therefore v_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_e + R_2 I_m$$



35

Para as duas configurações o amplificador sofre a mesma influência de I_B .

Já que a topologia é a mesma para um e outro caso, no que se refere à I_B , a componente $I_{B1}R_2$ pode ser forçada a zero colocando-se um resistor em série com V_{P1} .



$$\text{Se } I_P = 0 \Rightarrow V_o \Big|_{I_P=0} = R_2 I_m. \quad (\text{inv.})$$

$$\text{Se } I_m = 0 \Rightarrow V_o \Big|_{I_m=0} = -I_P R_x \left(\frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \quad (\text{n. inv.}),$$

$$V_o = R_2 I_m - I_P R_x \frac{R_2 + R_1}{R_1} = 0 \Rightarrow I_m R_2 = I_P R_x \frac{R_2 + R_1}{R_1}$$

$$\text{Se } I_m = I_P \Rightarrow R_2 = R_x \frac{R_2 + R_1}{R_1} \quad \times$$

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \parallel R_2$$

$$\text{Se } R_2 \gg R_1 \Rightarrow R_x \approx R_1.$$

N

Ac

E.

pc

A

V

f

.

a

~~o~~

V_{IO}

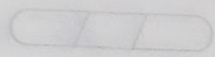
E_p

μm

V.

V_c

o



36

Exemplos:

LM 308

LF 356 (6 ft)

$$I_B = 1,5 \text{ mA typ.}$$

$$I_B = 30 \text{ pA typ.}$$

$$I_{os} = 0,2 \text{ mA typ.}$$

$$I_{os} = 3 \text{ pA typ.}$$

Não balanceamentos e assimetrias internas $\Rightarrow$ componentes c.c. na saída, também chamado de "efeito" c.c. do amp-op.

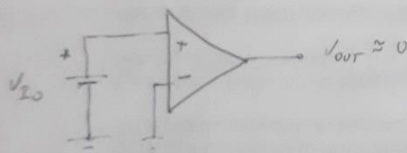
Esses não balanceamentos podem ser representados por um de dois parâmetros do op-amp: input offset voltage e output offset voltage. A tensão offset de entrada é usualmente o parâmetro preferido.

V_{IO} : tensão c.c. que deve ser aplicada de entre v_p e v_n para forçar $V_{OUT} = 0$ em condições de malha aberta.

V_{IO} pode variar com a temperatura.

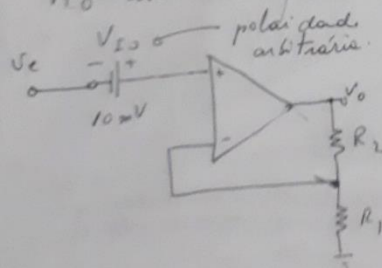
$|V_{IO}|$ típicos: entre $1\mu V$ e $10mV$.

O efeito de V_{IO} em um circuito op-amp pode ser modelado adicionando-se uma fonte de tensão aos terminais de entrada de um op-amp ideal:



Exemplo: Qual o efeito de tensão de offset na saída de um amplificador não-inverso, com um ganho de 100.

V_{IO} está na faixa de $\pm 10mV$.

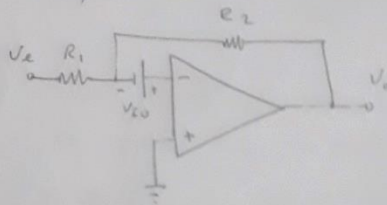


$$V_o = \frac{R_2 + R_1}{R_1} V_i + \frac{R_2 + R_1}{R_1} V_{IO}$$

$$V_o = 100 V_i + 100 \times (\pm 10mV)$$

$$V_o = 100 V_i \pm 1V \quad \text{componente de offset na saída.}$$

Exemplo:



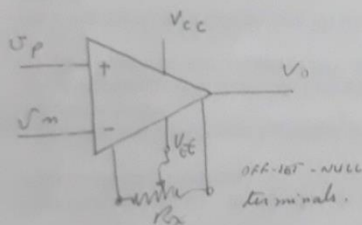
$$\frac{V_e - V_{i0}}{R_1} = \frac{V_{i0} - V_o}{R_2}$$

$$\frac{V_e}{R_1} - \frac{V_{i0}}{R_1} = \frac{V_{i0}}{R_2} - \frac{V_o}{R_2}$$

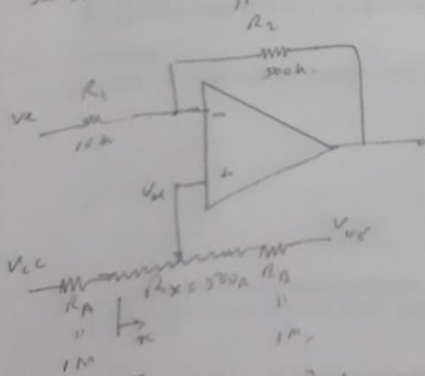
$$\frac{V_e}{R_1} - \frac{V_{i0}}{R_1} - \frac{V_{i0}}{R_2} = -\frac{V_o}{R_2} \rightarrow \frac{V_e}{R_1} - V_{i0} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = -\frac{V_o}{R_2}$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_e + V_{i0} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \frac{R_2}{R_2} \Rightarrow V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_e + V_{i0} \frac{R_2 + R_1}{R_1}$$

Correção do efeito da tensão de offset:



Exemplo: Op-amp com offset de tensão = 1 mV, sem disponibilidade de offset - null terminals.



$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{500k}{10k} = -50$$

V_x = contribuição de V_{CC} e V_{EE}

$$V_{EE} = 0 \Rightarrow V_{x1} = \frac{(1-x)R_x + R_0}{R_A + R_x + R_0} V_{CC}$$

$$V_{CC} = 0 \Rightarrow V_{x2} = \frac{xR_y + R_A}{R_A + R_y + R_0} V_{EE}$$

$$V_x = \frac{[(1-x)R_x + R_0] V_{CC} + (xR_y + R_A) V_{EE}}{R_A + R_0 + R_x}$$

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} V_x + \frac{R_1 + R_2}{R_1} (V_{E0} + V_x)$$

39

Para cancelar $V_{E0} \Rightarrow V_x = -V_{E0}$

Se $V_{EE} = -V_{CC}$ e $R_A = R_B$

~~$$V_{E0}$$~~

$$V_x = \frac{(1-x)R_x + R_B - (R_A + xR_x)}{R_A + R_B + R_x} V_{CC}$$

$$-V_{E0} = \frac{R_x - xR_x + R_B - R_A - xR_x}{R_A + R_B + R_x} V_{CC} = \frac{R_x(1-2x)}{R_A + R_B + R_x} V_{CC}$$

$$-V_{E0} = \frac{500(1-2x)15}{2M + 500} \approx 0,00375(1-2x)$$

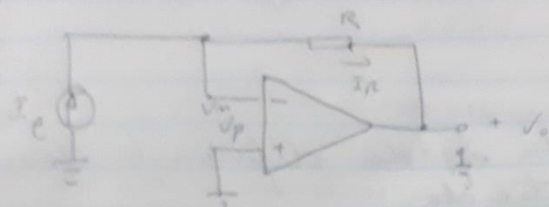
$$-1m = 0,00375(1-2x) = 3,75mV - 7,5mV \cdot x$$

$$-4,75m = -7,5mV \cdot x \Rightarrow x = \frac{4,75m}{7,5m} \Rightarrow \boxed{x = 0,63}$$

Note-se que esse ajuste coloca x mais perto de V_{EE} do que de V_{CC} , tal que V_x ligeiramente negativa é aplicada pela malha de R_x . Este resultado é consistente com um valor positivo de V_{E0} .

AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA

(Considerar I-V ou fonte de tensão controlada por corrente CCVS = current-controlled voltage source).



OP-AMP ideal.

$$I_e = I_R = \frac{V_{in} - V_o}{R} = -\frac{V_o}{R}$$

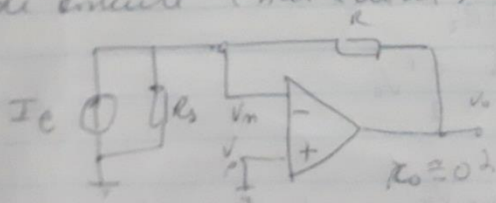
$$\therefore \boxed{V_o = -R I_e}$$

O elemento de realimentação não precisa ser uma resistência: pode ser uma impedância arbitrária Z .

$\Rightarrow V_o = -Z I_e$: amplificador de transimpedância.

O op-amp elimina o efeito de carregamento na entrada e na saída.

Seja R_s a resistência de entrada da fonte de corrente (não ideal):



Não há corrente através de R_s com $V_{in} = V_p = 0$.

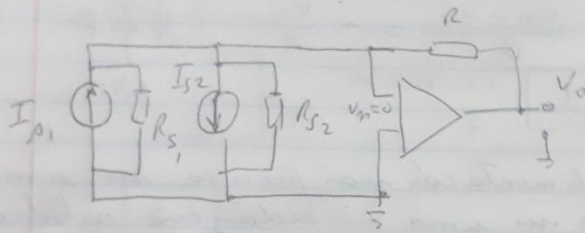
R constitui a sensibilidade do CI-V.

$$\text{Ex.: } S = \frac{1V}{mA} \Rightarrow R = 1k\Omega$$

$$S = \frac{1V}{\mu A} \Rightarrow R = 1M\Omega$$

Aplicações que exigem altas sensibilidade
 $\Rightarrow$ altos valores de R .
 $\Rightarrow$ problemas de injeção de corrente de fuga.
 - muito.

Ex.: Amplificador I_c de diferença das correntes de entrada.

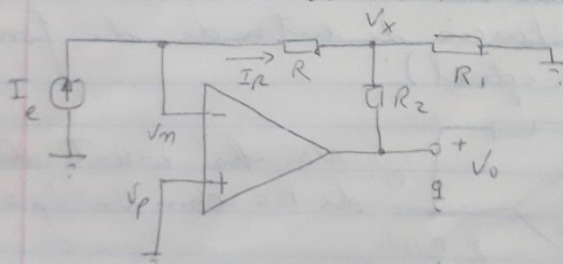


$$V_o = -R I_e$$

$$V_o = R I_{S2} - R I_{S1}$$

$$V_o = R (I_{S2} - I_{S1})$$

Muito em T : alcance alta sensibilidade sem necessitar de resistências muito altas.



$$I_R = I_e$$

$$I_R = \frac{V_n - V_x}{R} = -\frac{1}{R} V_x \Rightarrow V_x = -R I_e$$

$$\text{KLC em } X: \frac{0 - V_x}{R} + \frac{0 - V_x}{R_1} = \frac{V_x - V_o}{R_2}$$

$$\therefore -\frac{V_x}{R} - \frac{V_x}{R_1} = \frac{V_x - V_o}{R_2}$$

$$\frac{V_o}{R_2} = V_X \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$V_o = V_X \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_2} \right) = V_X \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) (-R) I_e.$$

Ex.: Especificar valores dos componentes para se
uma sensibilidade de $\frac{1V}{10mA}$.

$$a) \frac{1V}{10mA} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} \Omega = 100 M\Omega.$$

bastante alto!

$$b) \text{ Se } R = 1 M\Omega \quad \left\{ \left(\frac{R_2}{R} + \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \times 1M \right.$$

$$R_{eq} = 100 \text{ } \cancel{\text{k}} \Omega.$$

Seja $R = 1 M\Omega$ e $R_1 = 1 k\Omega$:

$$1 + \frac{R_2}{10^3} + \frac{R_2}{10^6} = 100$$

$$R_2 (10^{-3} + 10^{-6}) = 99 \Rightarrow R_2 = \frac{99}{0,001001} = 99 k\Omega.$$

$$\therefore \begin{cases} R = 1 M\Omega \\ R_1 = 1 k\Omega \\ R_2 = 100 k\Omega \end{cases}$$

~~Outro exemplo~~
sem o resistor