

# CAPÍTULO 2 - ELETRÔNICA APLICADA

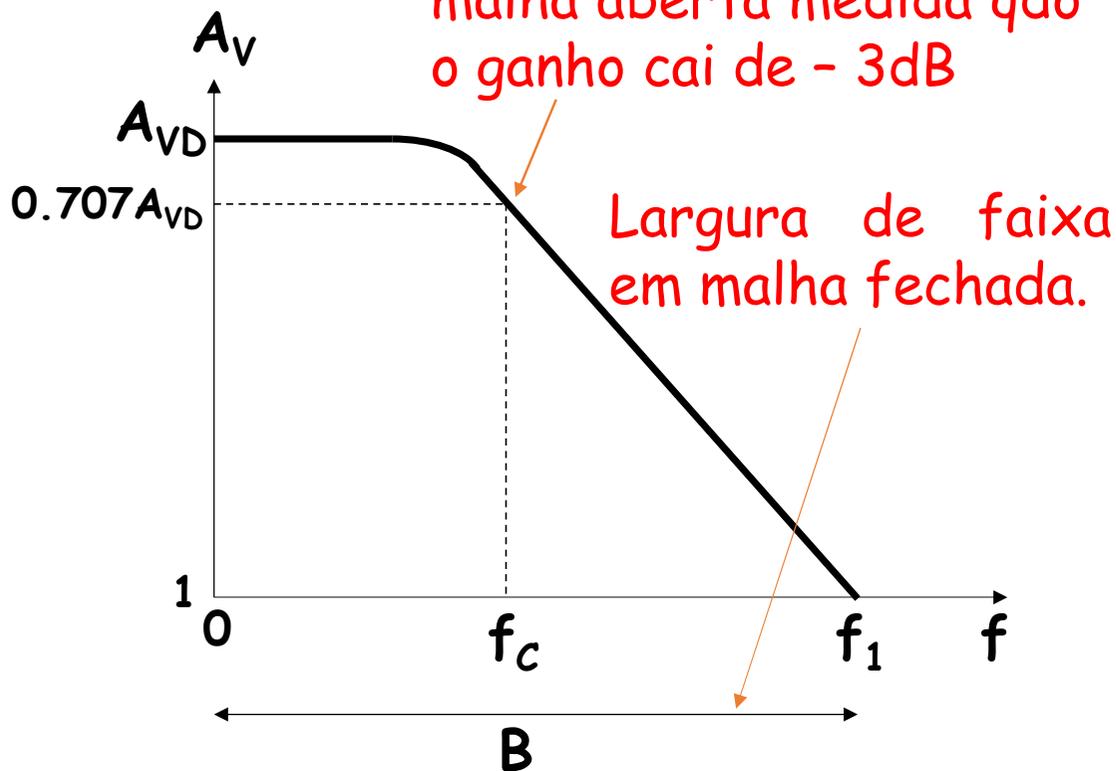


Prof. Luis Caldas  
Aula – Limitações

## 2 - Limitação do ganho x largura de faixa.

### 2.1 Curva do ganho x frequência do amplificador

Largura de faixa em malha aberta medida qdo o ganho cai de - 3dB



Onde,

$f_c$  = Frequência de corte.

$f_1$  = Frequência de ganho unitário ou de largura de faixa.

$B$  = largura de faixa.

O produto do ganho x largura de faixa:

$f_1 = A_{VD} \times f_c$  fornecido fabricante.

$GB = f_1$  (Produto x largura de faixa).

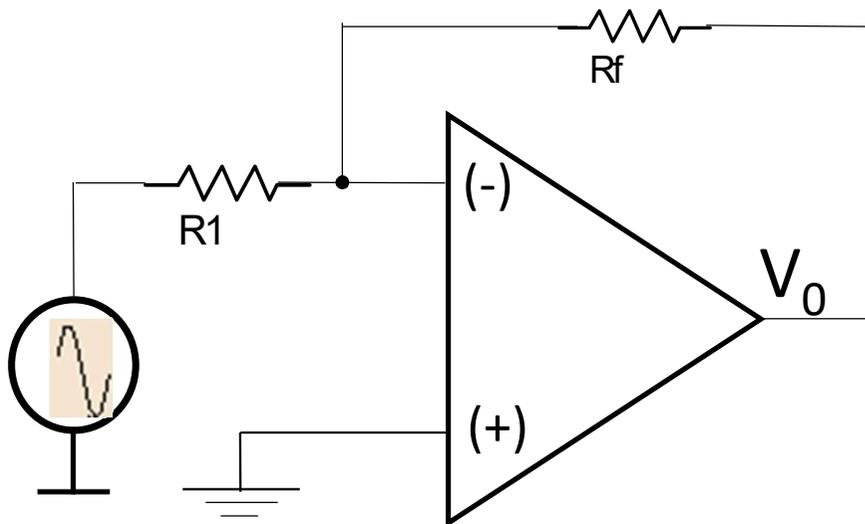
**Vantagem:** Ampliação da largura de faixa de malha aberta.

**Desvantagem:** Ganho reduzido.

## 2.2 - Exemplo da limitação do ganho x largura de faixa.

**Exemplo:** Determinar a frequência de corte de um Amp-Op. cujos valores especificados pelo fabricante são  $GB = 1\text{MHz}$  e  $A_{VD} = 200\text{V/mV}$ . Para um ganho igual a 10, qual a máxima frequência que pode ser aplicada ao amp-Op.

$f_c = f_1 / A_{VD} = 10^6 / 2 \cdot 10^5 = 5\text{Hz}$  e para  $A = 10$ , temos:  $f_{oper} = 100\text{KHz}$ .



Para um circuito inversor, onde  $R_1 = 10\text{K}$  e  $R_f = 100\text{K}$  e  $GB = 1\text{MHz}$ , pede-se:

a) Frequência de corte do circuito.

$\beta$  = Taxa de realimentação.

$f_c = \beta f_1$  assim  $\beta = R_1 / (R_1 + R_f) = 10\text{K} / 110\text{K} = 0,09$

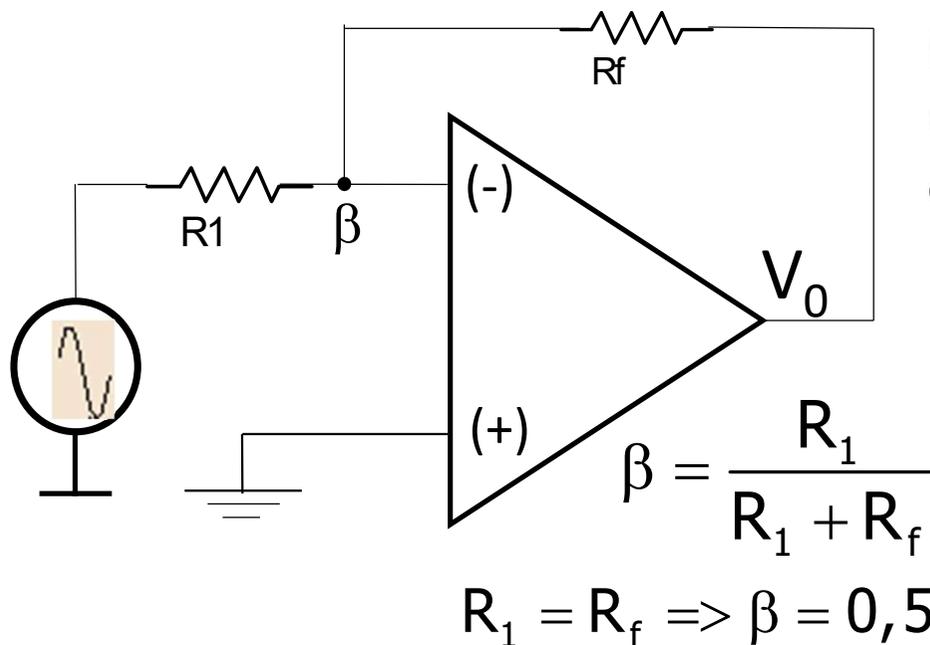
$f_c = 0,09 \times 10^6 = 90\text{KHz}$ .

# ELETRÔNICA APLICADA



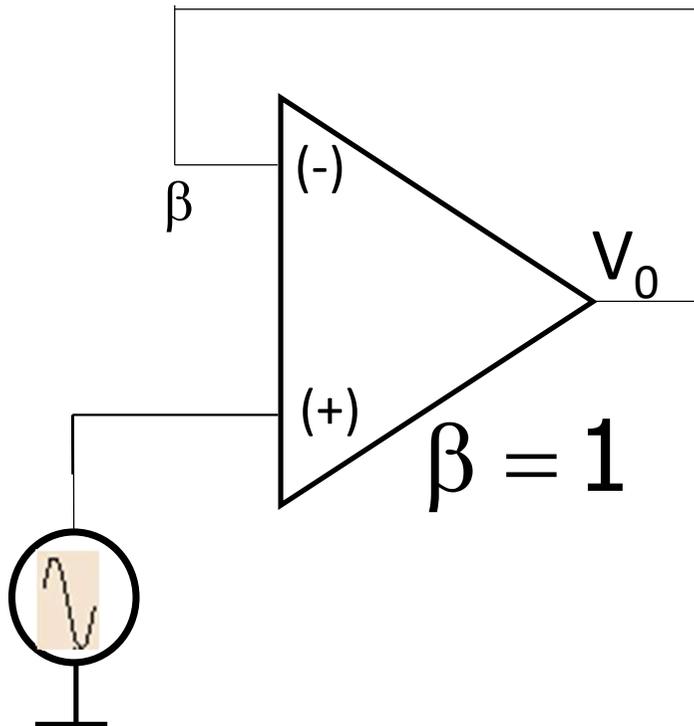
Prof. Luis Caldas  
Aula – Exemplo

**Exemplo:** Determinar a frequência de corte para a montagem inversor e não inversor cujos ganhos são unitários. Dados  $GB_W = 1\text{MHz}$ .



Para o circuito inversor, onde o ganho é unitário então  $R_1 = R_f$ . Sabe-se que  $f_c = \beta f_1$  e assim  $\beta = 0,5 \therefore f_c = 0,5 \times 1\text{MHz} = 500\text{KHz}$ .

## Continuação do exemplo 2.2



Para o circuito não inversor, onde o ganho é unitário então. Sabe-se que  $f_c = \beta f_1$  e assim  $\beta = 1,0 \therefore f_c = 1,0 \times 1\text{MHz} = 1\text{MHz}$ .

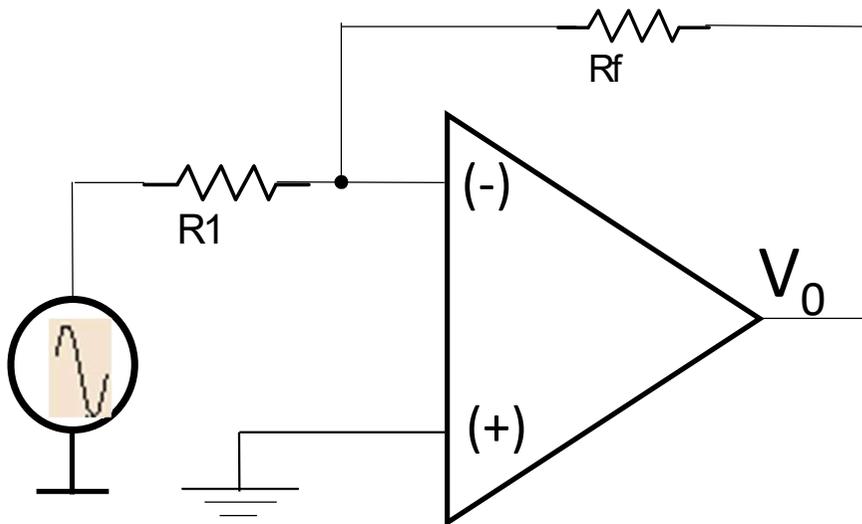
**Conclusão:** A montagem não inversor tem o dobro da resposta em frequência que a montagem inversor.

# ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas  
Aula – Exemplo

**Exemplo:** O circuito a seguir foi projetado para ter um ganho igual a  $-10$ . A frequência máxima do sinal de entrada é de  $200\text{KHz}$ . Sabendo-se que  $GB_W = 1\text{MHz}$ , qual a tensão máxima de saída quando é aplicado um sinal de entrada  $E_{\text{max}} = 1\text{V}$ . Repita para ganho =  $-100$  e frequência igual a  $50\text{KHz}$  e  $E_{\text{max}} = 0,2\text{V}$



Para a frequência de corte de  $200\text{KHz}$ , então:

$GB_W = 1\text{MHz}$  e  $f_c = \beta f_1 \Rightarrow 2 \cdot 10^5 = \beta \cdot 10^6$ , onde  $\beta = 0,2$  como  $A_{CL} = 1/\beta = 1/0,2 = -5$ .  
A saída será =  $-5\text{V}$

Para a frequência de corte de  $50\text{KHz}$ , então:

$GB_W = 1\text{MHz}$  e  $f_c = \beta f_1 \Rightarrow 5 \cdot 10^4 = \beta \cdot 10^6$ , onde  $\beta = 0,05$  como  $A_{CL} = 1/\beta = 1/0,05 = -20$ .  
A saída será =  $-4\text{V}$



## 2.3 Limitação pela taxa máxima da frequência do sinal (Slew-rate)

a. **Taxa de inclinação** = taxa máxima na qual a saída do amplificador pode variar em Volts por microssegundos ( $SR = V/\mu s$ ).

$$SR = \Delta V / \Delta t \text{ (V}/\mu\text{s)} \text{ e } \frac{\Delta V_0}{\Delta t} = A_{CL} \cdot \frac{\Delta V_i}{\Delta t}$$

### b. Máxima frequência do sinal

Sendo  $V_i(t) = E_{\max} \sin \omega t$  e o  $K$  = ganho do amplificador, então:

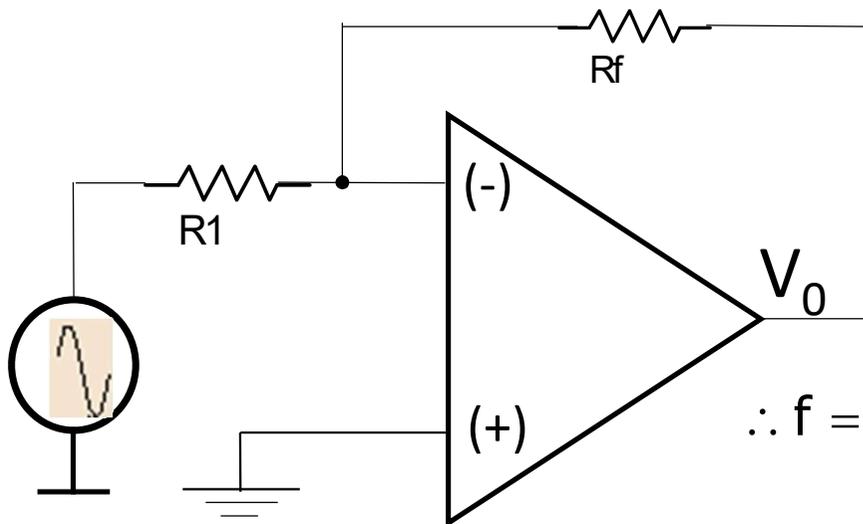
$$\frac{\Delta V_0}{\Delta t} = K \omega E_{\max} \cos \omega t = SR \text{ (} \cos \omega t = 1 \text{)} \Rightarrow SR = K \omega E_{\max}$$
$$\omega = 2\pi f = (\text{rad/s}) \therefore f = \frac{SR}{2\pi K E_{\max}} = (\text{Hz})$$



## 2.4 - Exemplo da limitação pela taxa de inclinação (Slew-rate).

**Exemplo1:** Determinar a frequência de corte de um Amp-Op. cujos valores especificados pelo fabricante é  $SR = 0,5V/\mu s$ . Qual a máxima frequência que pode ser aplicada ao amp-Op, para uma entrada de  $V_i = 20mV$  e  $R_f = 240K$  e  $R_1 = 10K$ .

$$A_{CL} = -R_f / R_1 = 240 \cdot 10^3 / 10^4 = K = -24 \text{ e } \omega \leq 5 \cdot 10^5 / 24 \times 20mV = 1.1 \times 10^6 \text{ rad/s.}$$



$$\omega = 2\pi f \Rightarrow f = \omega / 2\pi = 1.1 \times 10^6 / 2\pi$$
$$f_{MAX} = 175,16KHz.$$

$$\therefore f = \frac{SR}{2\pi K E_{max}} = (Hz)$$



## 2.4 - Exemplo da limitação pela taxa de inclinação (Slew-rate).

**Exemplo2:** Para um Amp-Op. cujo valor especificado pelo fabricante é  $SR = 2,0V/\mu s$ . Qual o máximo ganho de tensão de malha fechada que pode ser aplicada ao amp-Op, para uma entrada de  $V_i = 500mV$  em  $10\mu s$ .

**Solução:** Sabendo que:  $\frac{\Delta V_0}{\Delta t} = A_{CL} \cdot \frac{\Delta V_i}{\Delta t}$  Obtemos:

$$A_{CL} = \frac{\frac{\Delta V_0}{\Delta t}}{\frac{\Delta V_i}{\Delta t}} = \frac{SR}{\frac{\Delta V_i}{\Delta t}} = \frac{2V/\mu s}{0.5/10\mu s} = 40$$

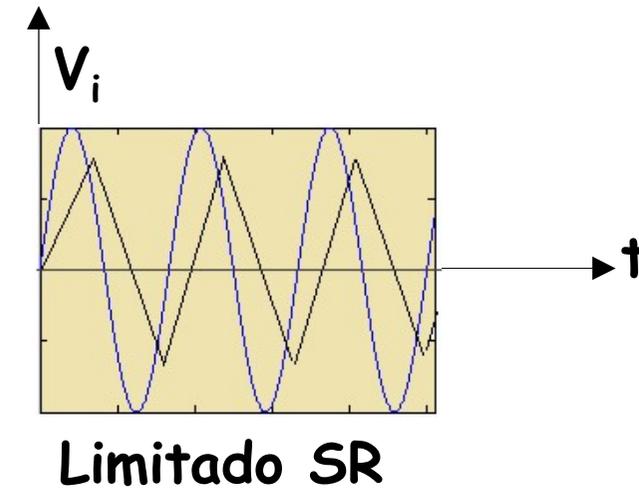
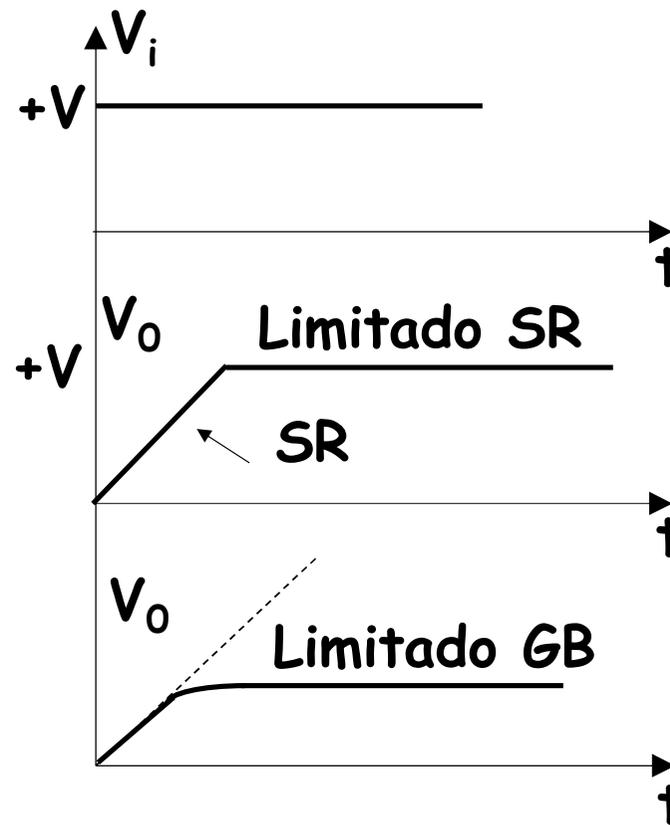
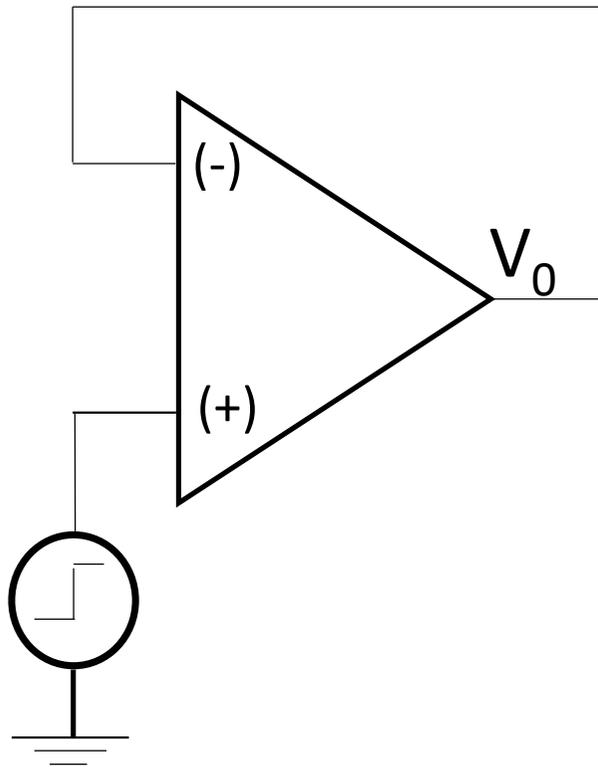
Um ganho de malha fechada acima de 40 levará a saída a variar mais rapidamente que a taxa de inclinação permitida.

# ELETRÔNICA APLICADA



*Prof. Luis Caldas*  
*Aula – Limitações*

## 2.5 Influência na resposta de saída do amp-op devido ao SR e ao GB.



# ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas  
Aula – Exemplos

**2.6 Exercício:** Para a instalação a seguir, são aplicados os sinais  $V_1 = 0.2\text{sen}10^4t$ ,  $V_2 = 5\text{sen}10^3t$ ,  $V_3 = 25\text{sen}10^3t$ ,  $V_4 = 0.5\text{sen}10^4t$ ,  $V_5 = \text{sen}10^5t$ . Sabendo-se  $SR = 0.5\text{V}/\mu\text{s}$  e o ganho  $K = 10$ . Quais os sinais de saída que distorcem?

$$SR = KE_{\max}\omega \quad \omega = \frac{SR}{KE_{\max}}$$

1. Para sinal  $V_1$

$$\omega = \frac{500 \times 10^3}{10 \times 0.2} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ rad/s}$$

2. Para sinal  $V_2$

$$\omega = \frac{500 \times 10^3}{10 \times 5} = 10^4 \text{ rad/s}$$

3. Para sinal  $V_3$

$$\omega = \frac{500 \times 10^3}{10 \times 25} = 2 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$$

4. Para sinal  $V_4$

$$\omega = \frac{500 \times 10^3}{10 \times 0.5} = 10^5 \text{ rad/s}$$

5. Para sinal  $V_5$

$$\omega = \frac{500 \times 10^3}{10 \times 1} = 5 \times 10^4 \text{ rad/s}$$

(O sinal distorce)

# ELETRÔNICA APLICADA



*Prof. Luis Caldas*  
*Aula – Exemplos*

**2.7 Exercício:** Qual deve ser o ganho para  $V_4 = \text{sen}10^5 t$  que não distorce?

$$SR = KE_{\max} \omega \quad \omega = \frac{SR}{KE_{\max}} \quad K = \frac{SR}{\omega E_{\max}}$$

1. Para sinal  $V_4$

$$K = \frac{500 \times 10^3}{10^5 \times 1} = 5$$



## 2.8 Taxa de rejeição de modo comum - CMRR.

Uma vez obtidos os ganhos de modo diferencial  $A_d$  e de modo comum  $A_c$  pode-se calcular a taxa de rejeição de modo comum CMRR definida como:

$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$  O valor do CMRR pode ser expresso em termos logarítmicos como:

$$CMRR = 20 \log \frac{A_d}{A_c} = \text{dB}$$

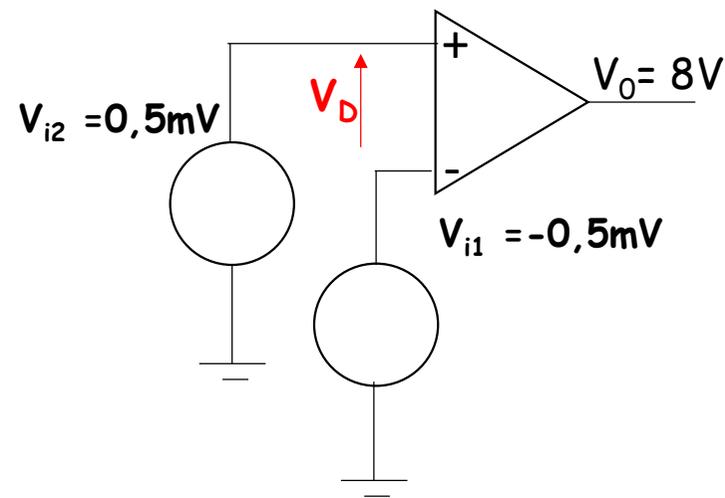
**Exemplo:** Calcular os ganhos de modo comum e diferencial das montagens a seguir. Uma vez obtidos os ganhos  $A_d$  e  $A_c$  calcular as CMRRs.

# ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas  
Aula – Limitações

**Exemplo:** Calcular os ganhos de modo comum e diferencial das montagens a seguir. Uma vez obtidos os ganhos  $A_d$  e  $A_c$  calcular as CMRRs.

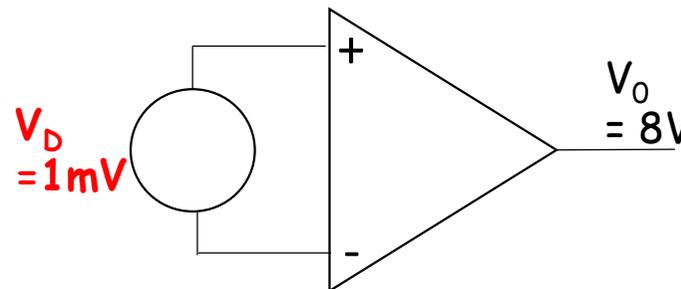


$$V_D = V_{i2} - V_{i1} = 0,5 - (-0,5) = 1\text{mV}$$

$$V_c = \frac{V_{i2} + V_{i1}}{2} = \frac{0,5 + (-0,5)}{2} = 0$$

$$V_0 = A_d V_D + A_c V_c \Rightarrow V_0 = A_d V_D$$

$$A_d = \frac{V_0}{V_D} = \frac{8000\text{mV}}{1\text{mV}} = 8000$$

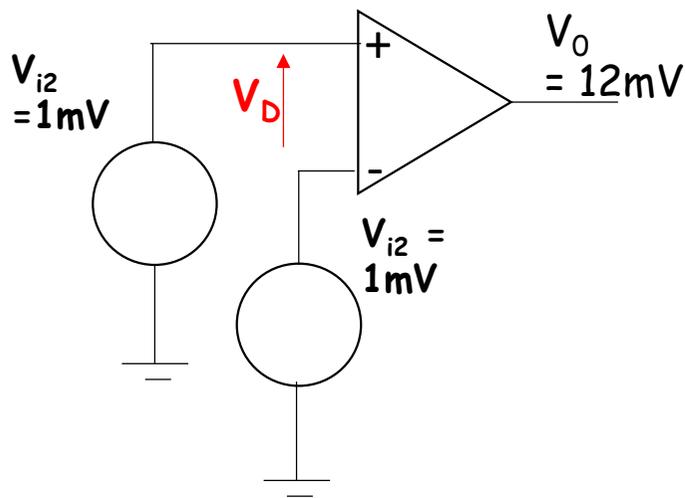


# ELETRÔNICA APLICADA



Prof. Luis Caldas  
Aula – Limitações

**Exemplo:** Calcular os ganhos de modo comum e diferencial das montagens a seguir. Uma vez obtidos os ganhos  $A_d$  e  $A_c$  calcular as CMRRs.

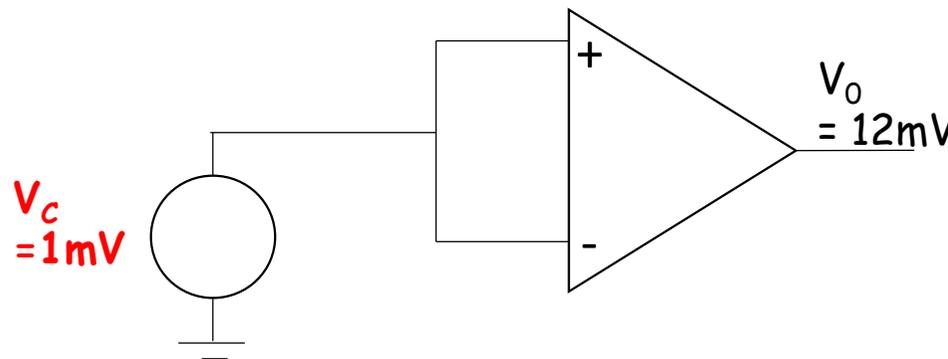


$$V_D = V_{i2} - V_{i1} = 1 - 1 = 0V$$

$$V_c = \frac{V_{i2} + V_{i1}}{2} = \frac{1 + 1}{2} = 1$$

$$V_0 = A_d V_D + A_c V_c \Rightarrow V_0 = A_c V_c$$

$$A_c = \frac{V_0}{V_c} = \frac{12mV}{1mV} = 12$$



$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{8000}{12} = 666,7$$

$$CMRR = 20 \log \frac{A_d}{A_c} = 56,4dB$$



A expressão de saída de um amplificador operacional pode ser expressa em termos de CMRR.

$$V_0 = A_d V_D + A_c V_c \Rightarrow V_0 = A_d V_D \left(1 + \frac{A_c V_c}{A_d V_D}\right)$$
$$V_0 = A_d V_D \left(1 + \frac{1}{\text{CMRR}} \frac{V_c}{V_d}\right)$$
$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c}$$
$$A_c = \frac{A_d}{\text{CMRR}}$$

**Exemplo:** Determinar a tensão de saída de um OPAMP para as tensões de entrada  $V = 150\mu\text{V}$  e  $V = 140\mu\text{V}$ . O amplificador tem ganho diferencial  $A = 4000$ . para  $\text{CMRR} = 100$  e  $\text{CMRR} = 10^5$ .

$$V_0 = A_d V_D \left(1 + \frac{1}{\text{CMRR}} \frac{V_c}{V_d}\right) = 4000 \times 10\mu\text{V} \left(1 + \frac{1}{100} \frac{145}{10}\right) = 45,8\text{mV}$$

$$V_0 = A_d V_D \left(1 + \frac{1}{\text{CMRR}} \frac{V_c}{V_d}\right) = 4000 \times 10\mu\text{V} \left(1 + \frac{1}{10^5} \frac{145}{10}\right) = 40,006\text{mV}$$

$$V_d = 150 - 140 = 10\mu\text{V}$$

$$V_c = \frac{150 + 140}{2} = 145\mu\text{V}$$



**Conclusão:** Quanto maior o valor da CMRR do operacional a saída pode ser aproximada a:

$$V_0 \cong A_d V_d$$

## **Resumo:**

1. O produto ganho x largura de faixa do amplificador operacional é constante;
2. O slew-rate do operacional é responsável pela fidelidade do sinal de entrada e saída;
3. A taxa de rejeição de modo comum é responsável em medir o desempenho do amplificador em reproduzir sinal de saída a componente diferencial.