

AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

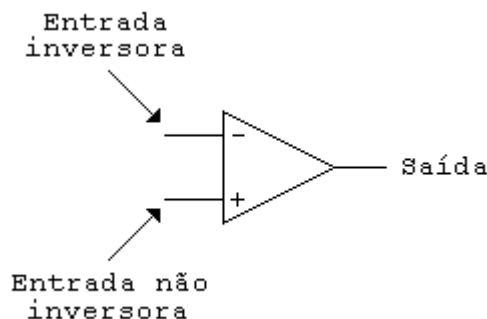
OBJETIVOS: Analisar o funcionamento de um amplificador operacional e seus principais parâmetros.

INTRODUÇÃO TEÓRICA

O nome *amplificador operacional* (também denominado *op-amp*) é usado quando muitos amplificadores convencionais são necessários para implementar uma grande variedade de operações lineares ou não lineares. Neste caso constrói-se um circuito básico cujas operações poderão ser agilizadas bastando para tanto, proceder apenas pequenas modificações externas ao circuito como a introdução ou alteração de resistores, capacitores, indutores, etc.

Existe atualmente uma grande variedade de amplificadores operacionais, geralmente encerrados em um único chip (pastilha), resultando em um custo de fabricação muito baixo.

O símbolo de um op-amp é mostrado abaixo:



- a) um sinal aplicado na entrada + aparecerá na saída amplificado e com a mesma fase.
- b) um sinal aplicado na entrada - aparecerá na saída amplificado, porém, defasado 180°.

Para a construção de op-amps utiliza-se tanto a tecnologia bipolar como a unipolar, sendo esta última recomendável quando se deseja altíssimas impedâncias de entrada.

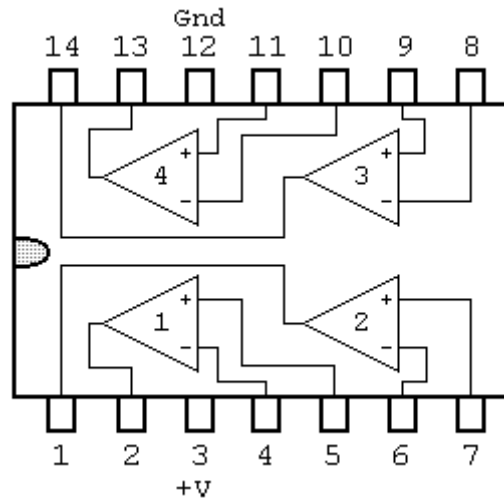
Além da alta impedância de entrada, outra característica importante do op-amp é o seu ganho elevado, que em malha aberta pode chegar a 100.000 (DC) que em última análise, pode ser considerado infinito.

Os fabricantes especificam esse ganho como:

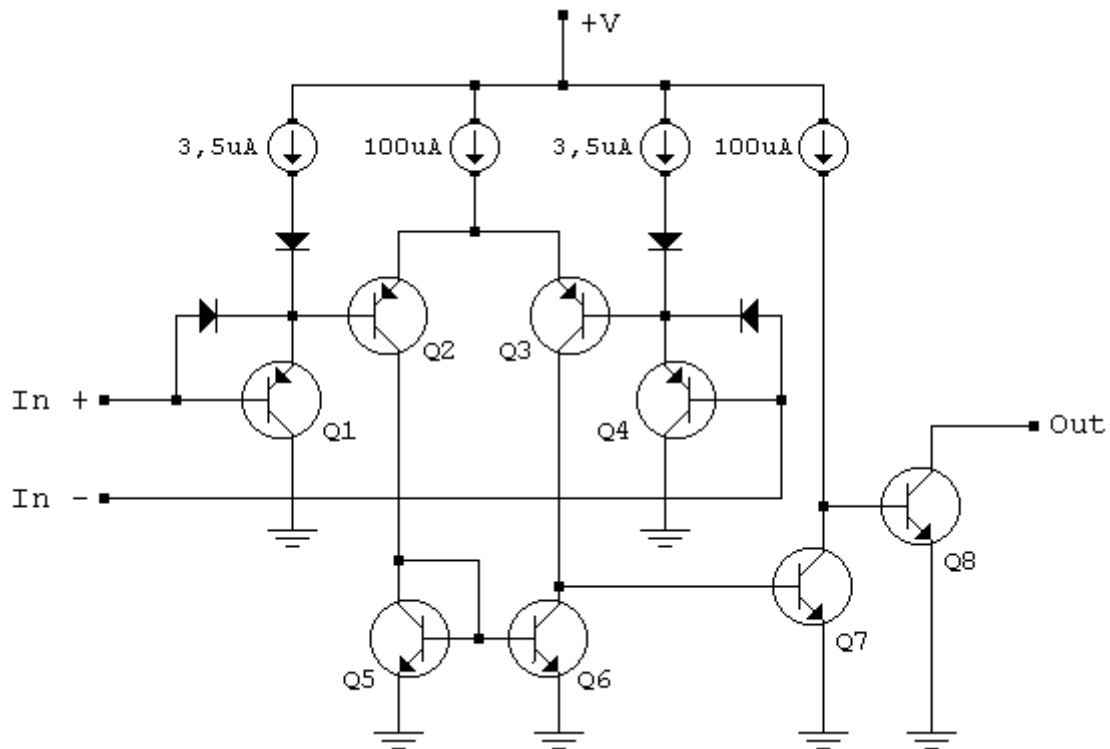
$$A_{VOL} (\text{ganho de tensão para grandes sinais}) = 100\text{V/mV} = 100.000 = 100\text{dB}$$

A quantidade de componentes dentro de um chip de um op-amp (transistores, resistores, diodos, etc.), determinam sua escala de integração.

A figura a seguir mostra um chip LM339 que contém quatro op-amps.



Veja na figura abaixo o esquema de cada um dos op-amps contidos no LM339:



PARÂMETROS ELÉTRICOS DC:

1 - Ganho de tensão diferencial - ganho para grandes sinais: A_{VOL}

Geralmente esse ganho é fornecido em decibéis, sendo a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada.

Pode ser assim calculado:

$$A_{dB} = 20 \log |A_v| = 20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right|$$

Como exemplo, um ganho de tensão de 500 é a mesma coisa que:

$$A_{dB} = 20 \log 500 = 20(2,69897) = 53,98dB$$

Por outro lado, uma ganho de 60dB corresponde a:

$$\frac{60}{20} = \log A_v \rightarrow 3 = \log A_v$$

$$A_v = \text{antilog } 3 = 1.000$$

OBS: antilog de 3 é a mesma coisa que 10^3 .

EXEMPLOS:

a) Um amplificador operacional possui um ganho de tensão igual a 820. Calcular o ganho em dB.

Solução:

$$A_{dB} = 20 \log 820 = 20(2,914) = 58,28dB$$

b) Sabe-se que um amplificador operacional tem um ganho de 50dB. Calcule o ganho em tensão.

Solução:

$$50 = 20 \log A_v \rightarrow \frac{50}{20} = \log A_v$$

$$A_v = \text{antilog } 2,5 = 10^{2,5} = 316,22$$

2 - Resistência de entrada simples: R_{IN}

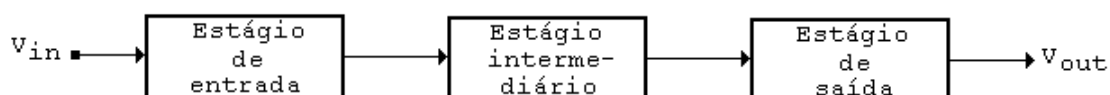
É a resistência medida em cada um dos terminais de entrada. Trata-se de um parâmetro muito importante quando vários estágios são interligados.

Os op-amps fabricados com a tecnologia bipolar tem uma resistência de entrada típica de $1M\Omega$, enquanto que na tecnologia bipolar essa resistência varia entre 10^{12} a $10^{15} \Omega$.

3 - Resistência de saída: R_O

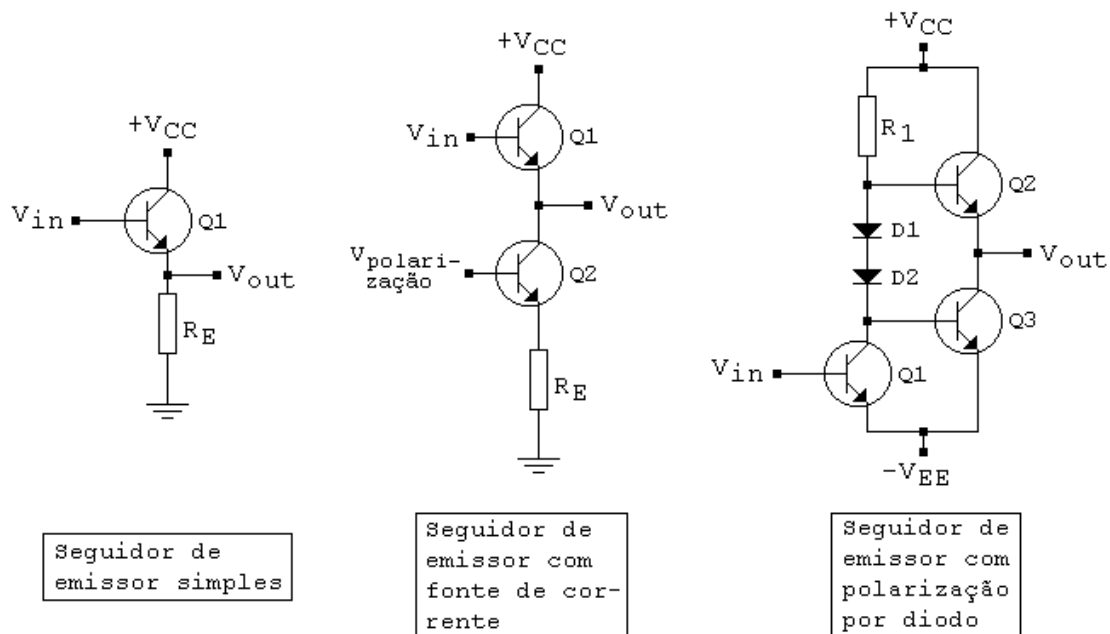
A resistência típica é da ordem de 100Ω , a qual depende do estágio de saída usado para fornecer sinal à carga.

O amplificador operacional possui um estágio de entrada, o qual recebe o sinal e um estágio de saída para fornecer o sinal à carga; em alguns casos, possui também um estágio intermediário, conforme ilustra o diagrama de blocos abaixo:



O estágio intermediário serve para compensar eventuais distúrbios operacionais entre entrada e saída como, perda de amplitude de sinal, casamento de impedâncias, etc.

Veja a seguir alguns estágios de saída usados nos op-amps.



4 - Taxa de rejeição em modo comum (Common Mode Rejection Ratio - CMRR)

É definida como a relação do ganho de tensão diferencial com o ganho de tensão em modo comum.

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} \rightarrow CMRR = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \text{ dB}$$

Para um valor de $CMRR = 80$, corresponde a:

$$\frac{A_d}{A_c} = \text{antilog} \frac{CMRR(dB)}{20} = \text{antilog} \frac{80}{20} = 10^4 = 10.000$$

Isto significa que o sinal comum ou de mesma polaridade é amplificado com um ganho 10.000 vezes menor do que as entradas diferenciais ou de polaridades opostas.

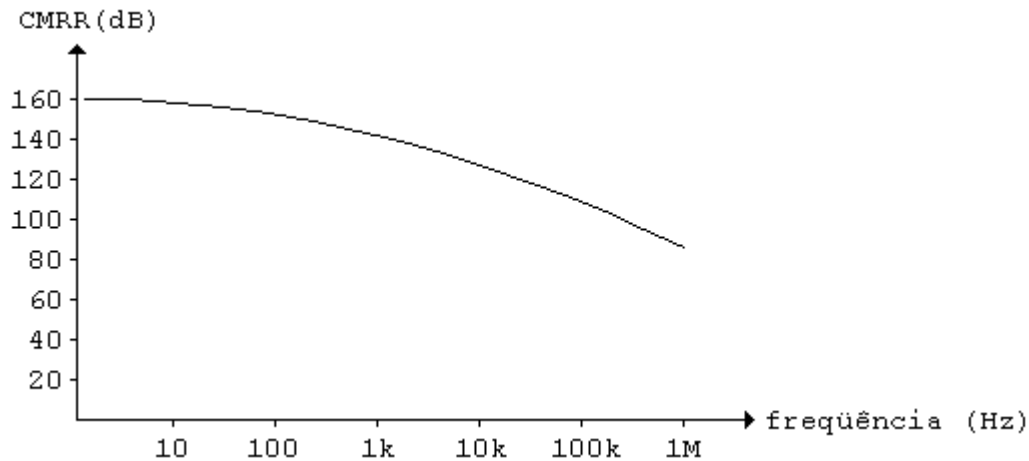
EXEMPLO: Em um amplificador operacional de $CMRR = 120\text{dB}$, aplica-se nas entradas um sinal comum (mesma polaridade) de 1V. Qual será a saída?

Solução:

$$\frac{A_d}{A_c} = \text{antilog} \frac{120}{60} = \text{antilog} 6 = 10^6 = 1.000.000$$

$$V_o = \frac{1}{1.000.000} = 1\mu\text{V}$$

A taxa de rejeição de modo comum sofre interferência da frequência, isto é, tende a diminuir com o aumento da frequência, conforme pode ser observado no gráfico a seguir:



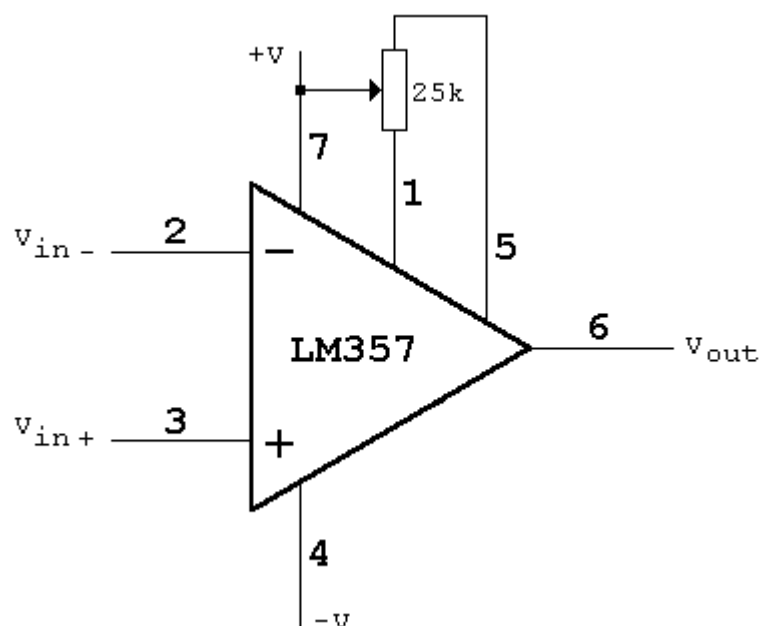
5 - Tensão de offset (entrada): V_{OS}

É definida como sendo a tensão diferencial necessária entre as entradas de um amplificador diferencial para forçar a saída em 0V.

No caso ideal V_{OS} deveria ser de 0V, mas na prática é de alguns mV.

Quando o op-amp opera com grandes sinais esta pequena tensão de offset é aceitável, mas em pequenos sinais pode implicar em erros consideráveis.

Portanto, quando um op-amp for utilizado para operar com sinais muito baixos, deve-se escolher um com tensão de offset desprezível ou que permita o ajuste desta tensão, como no caso do op-amp LM357 mostrado abaixo:

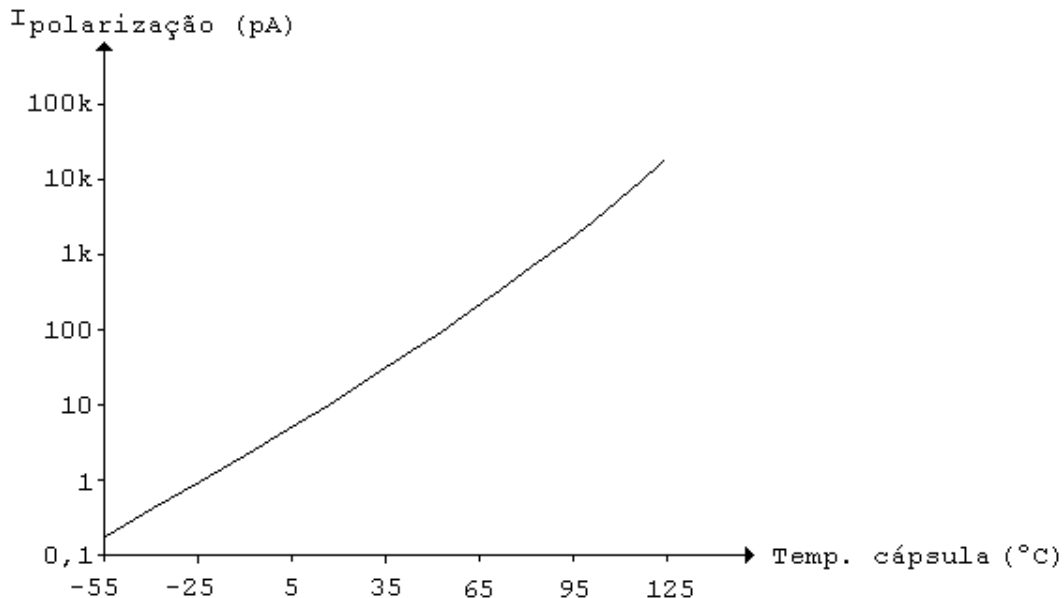


O fabricante recomenda o uso de um trimpot ou potenciômetro de $25k\Omega$ entre os pinos 1 e 5, que deve ser ajustado até que a saída seja 0V com os terminais de entrada aterrados ($V_d = 0V$).

6 - Corrente de polarização: $I_{POLARIZAÇÃO}$

Para que o CI de um op-amp opere adequadamente é necessário fornecer-lhe uma corrente de polarização, de acordo com as especificações do fabricante. Para CIs fabricados com a tecnologia bipolar essa corrente é da ordem da microampères e para os fabricados segundo a tecnologia unipolar essa corrente é da ordem de nanoampères e em alguns casos picoampères.

Geralmente os fabricantes especificam essa corrente à temperatura de 25°C, no entanto, aumenta bastante com a temperatura. O gráfico abaixo dá uma idéia da variação da corrente com a temperatura para um op-amp fabricado segundo a tecnologia unipolar.



7 – Desvio

É o termo que descreve a mudança na tensão de saída em função da variação da temperatura, mesmo quando esta é ajustada em 0V à temperatura ambiente.

O desvio da tensão de offset é dado por $\Delta V_{OS} / \Delta T$ e em geral varia entre 5 e 40 $\mu V / ^\circ C$. Adota-se como regra geral uma variação da ordem de 3,3 $\mu V / ^\circ C$ para cada mV da tensão de offset original.

A corrente de offset também sofre desvio em função da temperatura. O valor típico desse desvio ($\Delta I_{OS} / \Delta T$) é da ordem 0,01 a 0,5 nA / $^\circ C$.

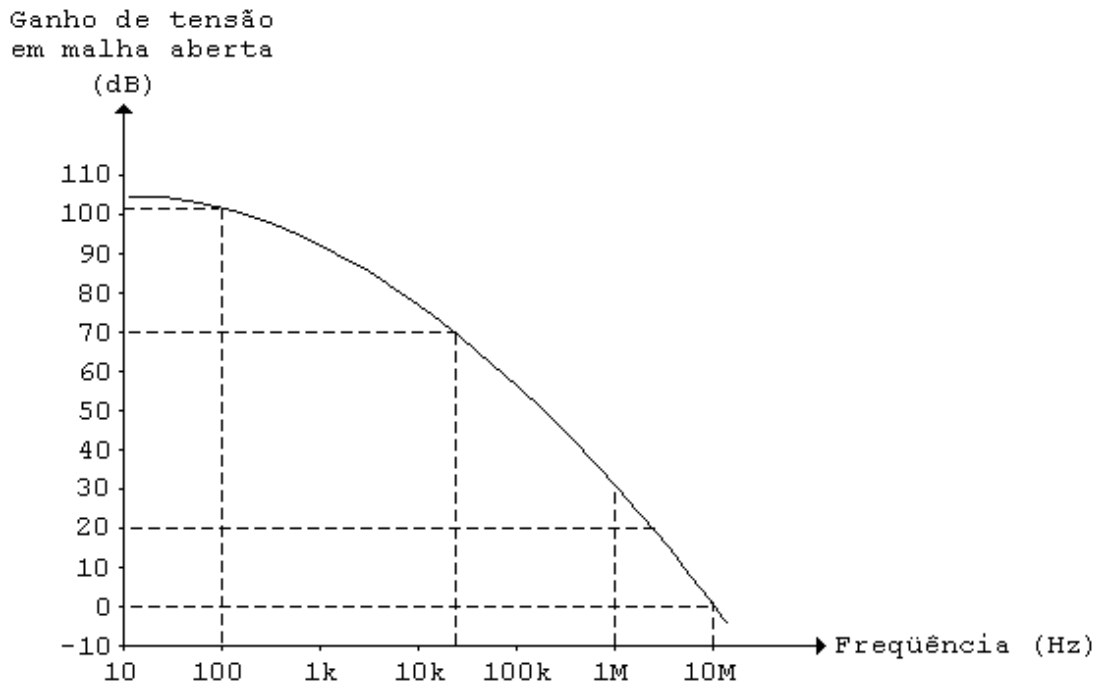
PARÂMETROS ELÉTRICOS AC:

1 - Banda passante: B

A banda passante do ganho unitário de um op-amp especifica a frequência superior na qual o ganho se reduz à unidade (ganho = 1), devido as capacitâncias resultantes da fabricação do circuito.

A banda passante é especificada por alguns fabricantes como largura de banda, do inglês *BW* - *Bandwidth*.

À medida que o ganho aumenta a banda passante diminui, conforme ilustra o gráfico a seguir:



Observa-se que na frequência de 100Hz o ganho está ao redor de 100dB enquanto que ao redor de 30kHz o ganho cai para 70dB; em 10MHz o ganho cai para 0dB.

A banda passante pode ser especificada pelo tempo de subida: t_r

$$B = 0,35 / t_r$$

Se o fabricante especificar um tempo de subida (rise time) $t_r = 0,25\mu s$, o valor da banda passante será:

$$B = 0,35 / 0,25\mu s = 1,4MHz$$

O ganho está relacionado com a banda passante (B) e a faixa de passagem (FP).

A faixa de passagem representa a máxima frequência que um op-amp pode responder em função do ganho. Assim:

$$G = \frac{B}{FP} \rightarrow FP = \frac{B}{G}$$

Se um op-amp operar com um ganho de 100 e se $t_r = 0,4\mu s$, a FP será:

$$B = 0,35 / 0,4\mu s = 875kHz$$

$$FP = \frac{875kHz}{100} = 8,75kHz$$

Isto significa que com ganho igual a 100, a máxima frequência fica limitada a 8,75kHz.

Operando com um ganho menor, por exemplo 20, a FP aumentará:

$$FP = \frac{875kHz}{20} = 43,75kHz$$

Exemplos:

a) Um op-amp tem um $t_r = 0,12\mu s$. Qual deverá ser o ganho para uma faixa de passagem de 40kHz?

Solução:

$$B = 0,35 / 0,12\mu s = 2,92\text{MHz}$$

$$G = \frac{2,92\text{MHz}}{0,04\text{MHz}} = 73$$

b) Um op-amp cujo $t_r = 0,35\mu s$ deve operar com ganho igual a 50. Qual é a faixa de passagem para esse ganho?

Solução:

$$B = 0,35 / 0,35\mu s = 1\text{MHz}$$

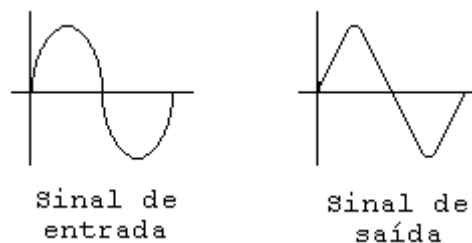
$$FP = \frac{1\text{MHz}}{50} = 20\text{kHz}$$

2 - Taxa de variação: SR (Slew Rate)

A taxa de variação é um parâmetro que indica quão rápido a tensão de saída muda com o tempo.

Os valores típicos vão de $0,5\text{V}/\mu s$ a $50\text{V}/\mu s$, sendo que valores maiores indicam maior velocidade de operação do dispositivo.

Quando essa taxa de variação é muito baixa, em frequências mais altas ocorre uma distorção entre os sinais de entrada e saída.

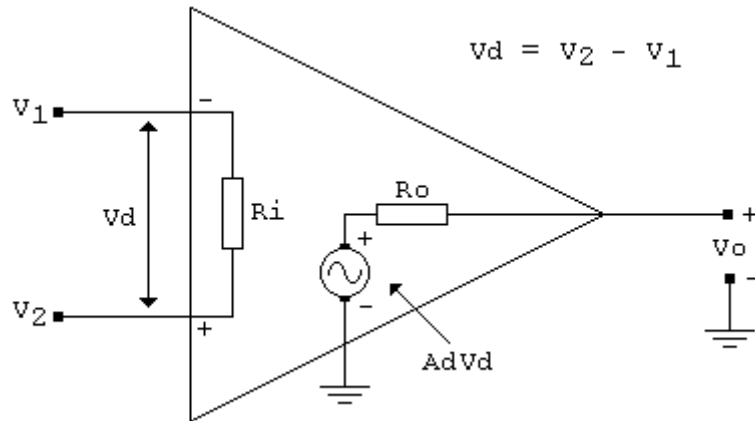


Observa-se que o sinal de saída não acompanhou a variação relativa ao sinal de entrada, apresentando distorção.

ANÁLISE DO OP-AMP

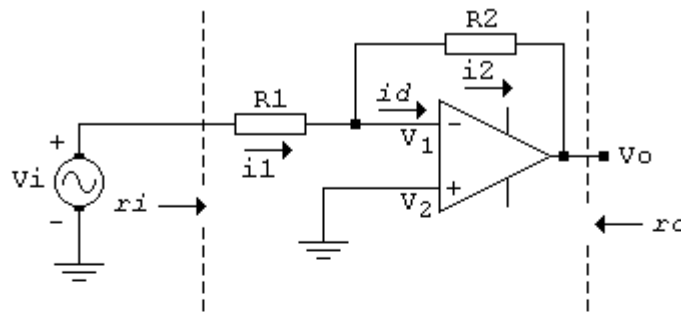
Passaremos a analisar o comportamento de um op-amp em função de componentes externos que lhes são adicionados: resistores, capacitores, fontes de alimentação, etc.

O circuito equivalente típico de um op-amp é mostrado a seguir:

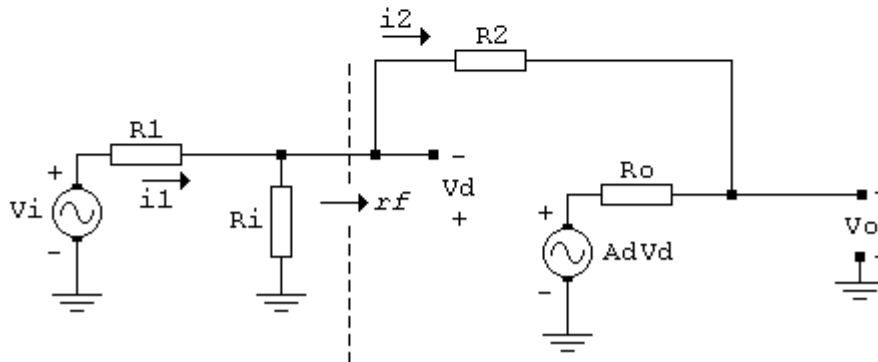


Análise do op-amp inversor:

Tomemos como exemplo o circuito abaixo e respectivo circuito equivalente:



CIRCUITO EQUIVALENTE



OBS: R2 é o resistor de realimentação

Cálculo do ganho: Av

Analisando o circuito equivalente temos:

$$i1 = \frac{Vi + Vd}{R1} = i2 = \frac{-Vd - Vo}{R2}$$

Contudo, $Vd = Vo/Ad$ e no op-amp ideal $Vd = 0$, logo:

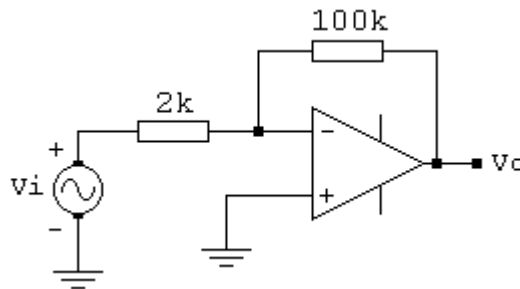
$$\frac{Vi}{R1} = - \frac{Vo}{R2}$$

Teremos então:

$$Av = \frac{Vo}{Vi} = - \frac{R2}{R1}$$

Isto implica que a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída depende da relação entre R2 e R1, onde R2 = 100k e R1 = 2k.

EXEMPLO: Qual é o ganho do circuito abaixo:



Solução:

$$A_v = 100k / 2k = 50$$

Impedância de entrada: ri

$$r_i = \frac{V_i}{i_1}$$

aplicando LKT:

$$V_i = (R_1)i_1 - V_d$$

levando-se em conta que num op-amp ideal $V_d = 0$, então: $r_i \cong R_1$

A impedância de entrada pode ser calculada pela fórmula:

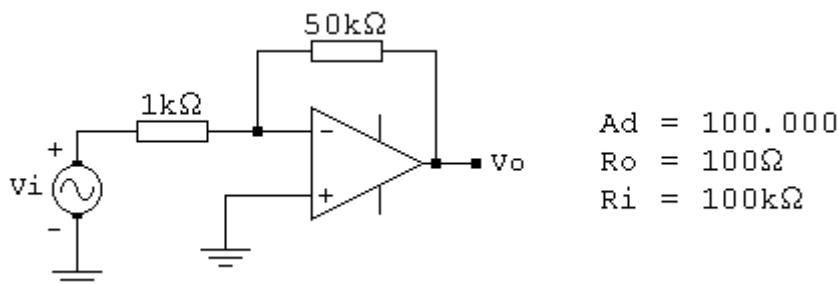
$$r_i = R_1 + \frac{R_2 + R_o}{1 + A_d}$$

Impedância de saída: ro

A impedância de saída pode ser calculada pela fórmula:

$$r_o = \frac{R_o}{1 + (R_1 A_d) / (R_1 + R_2)}$$

EXEMPLO: Calcule A_v , r_i e r_o no circuito a seguir:



Solução:

$$A_v = - \frac{R_2}{R_1} = \frac{50k\Omega}{1k\Omega} = - 50$$

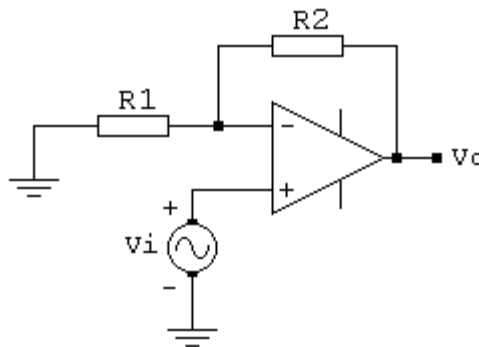
$$r_i = R_1 + \frac{R_2 + R_o}{1 + A_d} = 1.000 + \frac{50.000 + 100}{1 + 100.000} = 1.000 + 0,5 = 1.005 \Omega$$

logo, podemos considerar $r_i = R_1$

$$r_o = \frac{R_o}{1 + \frac{(R_1 A_d)}{(R_1 + R_2)}} = \frac{100}{1 + \frac{(1.000 \times 100.000)}{51.000}} = 0,05 \Omega$$

Análise do op-amp não inversor:

O circuito básico é mostrado abaixo:

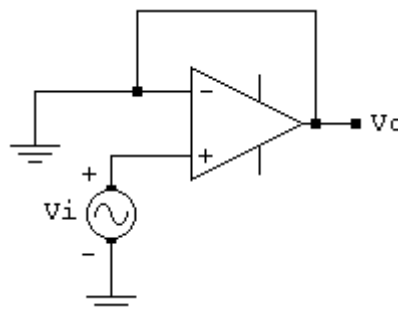


Ganho: A_v

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Neste caso, o ganho será sempre maior do que 1 ($A_v > 1$). Para o ganho se tornar igual a 1 ($A_v = 1$), caracterizando assim um seguidor de tensão, R_2 deve ser curto-circuitado e R_1 removido.

O circuito a seguir mostra um seguidor de tensão ($A_v = 1$), muito útil como casador de impedâncias.



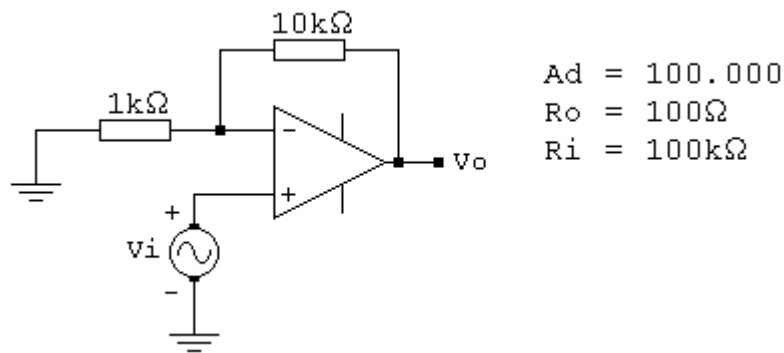
Impedância de entrada: r_i

$$r_i = \frac{AdR_i}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

Impedância de saída: r_o

$$\frac{1}{r_o} = \frac{1 + \frac{(R_1Ad)}{(R_1 + R_2)}}{R_o} + \frac{1}{R_1 + R_2}$$

EXEMPLO: Calcule A_v , r_i e r_o no circuito abaixo:



Solução:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{10.000}{1.000} = 1 + 10 = 11$$

$$r_i = \frac{AdR_i}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = \frac{100.000 \times 100.000}{1 + \frac{10.000}{1.000}} = 10^{10} / 11 \cong 1G\Omega$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_o} &= \frac{1 + \frac{(R_1Ad)}{(R_1 + R_2)}}{R_o} + \frac{1}{R_1 + R_2} \\ &= \frac{1 + \frac{100.000 \times 100.000}{11.000}}{100} + \frac{1}{11.000} = 9,1 \times 10^3 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r_o} = 9,1 \times 10^3 \rightarrow r_o = 1/9,1 \times 10^3 = 1,09 \times 10^{-4}\Omega \cong 0\Omega$$

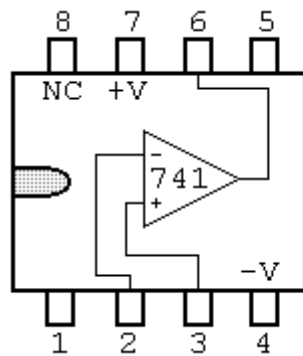
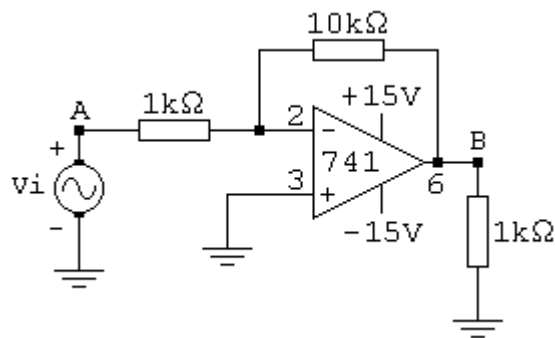
PARTE PRÁTICA

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 1 - Fonte de alimentação simétrica 0-20V
- 1 - Circuito integrado LM741 ou CA741
- 1 - Gerador de áudio
- 1 - Osciloscópio
- 1 - Multímetro analógico ou digital
- 1 - Módulo de ensaios ELO-1
- 1 - Proto-board

I - ANÁLISE DO GANHO E RESPOSTA DE FREQUÊNCIA:

1 - Monte o circuito abaixo:



pinos 1 e 5 = offset null

DADOS PARA O CI LM741 - VALORES TÍPICOS

- Tensão de alimentação $\pm 15V$
- CMRR = 90dB
- Ganho em malha aberta (A_{VOL}) = 200V/mV
- Resistência de entrada (R_{IN}) = 2M Ω
- Resistência de saída (R_{OUT}) = 75 Ω
- Tempo de subida (t_r) = 0,3 μs
- Slew rate = 0,5V/ μs
- Tensão de offset de entrada (V_{OS}) = $\pm 15mV$
- Corrente de offset de entrada (I_{OS}) = 20nA

Corrente de polarização de entrada ($I_{POLARIZAÇÃO}$) = 80nA
 Desvio ($\Delta V_{OS} / \Delta T$) = 15 μ V/ °C

- 2 - Ajuste o gerador de áudio para uma amplitude de 100mV_{rms} e frequência de 1kHz;
- 3 - Ligue um dos canais do osciloscópio na entrada (ponto A) e outro canal na saída (ponto B);
- 4 - Calcule o ganho do circuito e anote na tabela 1. Use para isso a relação entre os resistores de realimentação e de entrada.
- 5 - Observe na tela do osciloscópio os sinais de entrada e saída, quanto a forma de onda e amplitude; meça estes sinais e anote na tabela 1;
- 6 - Com base nos sinais de entrada e saída medidos no osciloscópio, calcule o ganho do circuito e anote na tabela 1;

Tabela 1

	CALCULADO	MEDIDO
Ganho		
Sinal de entrada (Vpp)	s/anotação	
Sinal de saída (Vpp)	s/anotação	

- 7 - Substitua o resistor de 1k Ω por um de 2,2k Ω e com base nos itens 4, 5, 6 complete a tabela 2;

Tabela 2

	CALCULADO	MEDIDO
Ganho		
Sinal de entrada (Vpp)	s/anotação	
Sinal de saída (Vpp)	s/anotação	

- 8 - Compare as tabelas 1 e 2 e apresente suas conclusões:

- 9 - O próximo passo será verificar o comportamento do circuito para diversas frequências do sinal de entrada. **Retorne o resistor de 1k Ω à sua posição original.**

- 10 - Mantenha a amplitude do gerador em 100mV_{rms}. Meça a amplitude do sinal na saída para cada uma das frequências listadas na tabela 3.

- 11 - Com base nos valores medidos, calcule o ganho do circuito para cada frequência e anote na tabela 3;

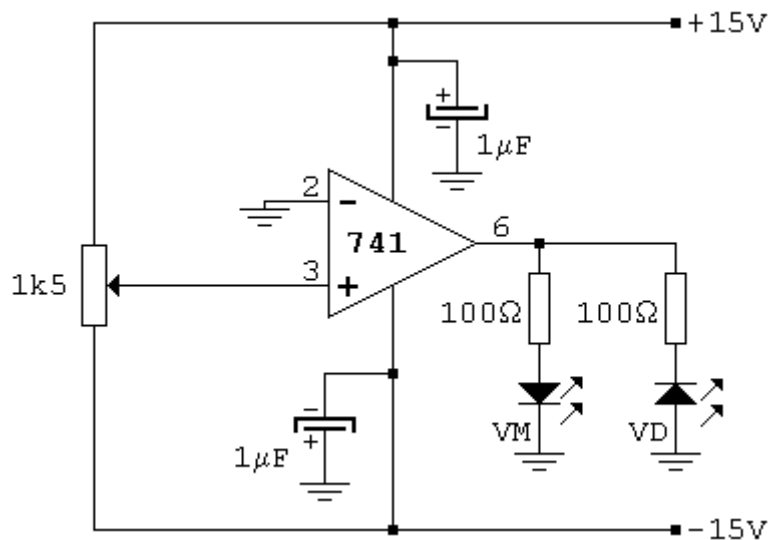
Tabela 3

Frequência	Vo (Vpp)	Ganho
100Hz		
200Hz		
500Hz		
1kHz		
2kHz		
5kHz		
10kHz		
20kHz		
50kHz		
100kHz		
1MHz		
10MHz		

12 - Apresente suas conclusões quanto aos resultados obtidos na tabela 3:

II - DETETOR DE CRUZAMENTO ZERO:

1 - Monte o circuito abaixo:



2 - Gire o cursor de trimpot à esquerda e à direita e observe o que ocorre com os leds;

3 - Movimente o cursor do trimpot de modo a obter na entrada uma tensão de +300mV (pino 3). Anote a tensão na saída e o led que estará aceso, apresentando suas conclusões.

Tensão na entrada	Tensão na saída	Led aceso
+300mV		

Conclusões:

4 - Movimente o cursor do trimpot de modo a obter na entrada uma tensão de -300mV (pino 3). Anote a tensão de saída e o led que estará aceso.

Tensão na entrada	Tensão na saída	Led aceso
-300mV		

Conclusões:

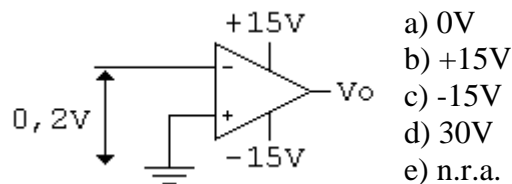
5 - Descreva brevemente o funcionamento do circuito:

QUESTÕES:

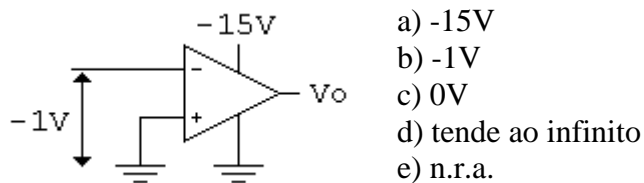
1 - Um amplificador diferencial é utilizado como estágio de entrada de:

- a) microprocessadores
- b) amplificadores classe AB
- c) uma porta lógica
- d) amplificadores push-pull
- e) nenhuma das respostas anteriores

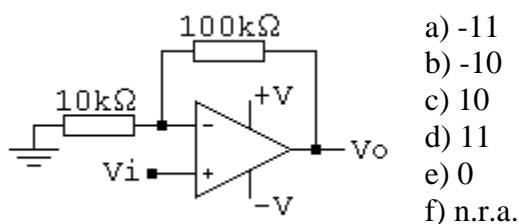
2 - No circuito abaixo, qual é a tensão de saída (V_o), considerando o op-amp ideal?



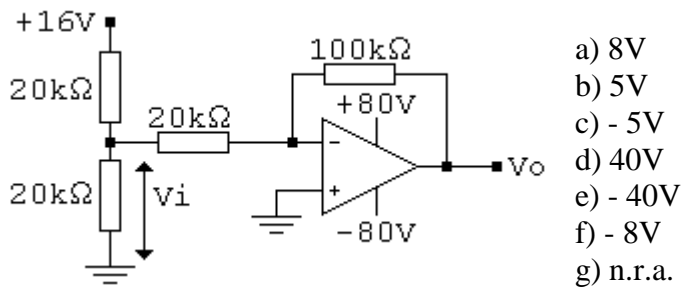
3 - No circuito abaixo, qual é a tensão de saída (V_o), considerando o op-amp ideal?



4 - Calcule o ganho do op-amp abaixo:

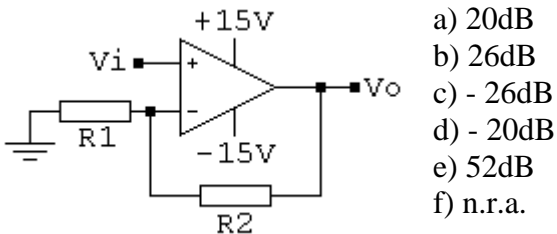


5 - Qual é a tensão de saída (V_o) no circuito abaixo:



- a) 8V
- b) 5V
- c) - 5V
- d) 40V
- e) - 40V
- f) - 8V
- g) n.r.a.

6 - No circuito abaixo, sabe-se que $V_i = 0,5V$ e $V_o = 10V$ e o op-amp é ideal. Qual é o ganho em dB?



- a) 20dB
- b) 26dB
- c) - 26dB
- d) - 20dB
- e) 52dB
- f) n.r.a.

7 - Qual é a finalidade do resistor de realimentação que liga a saída de um op-amp à sua entrada inversora?
