

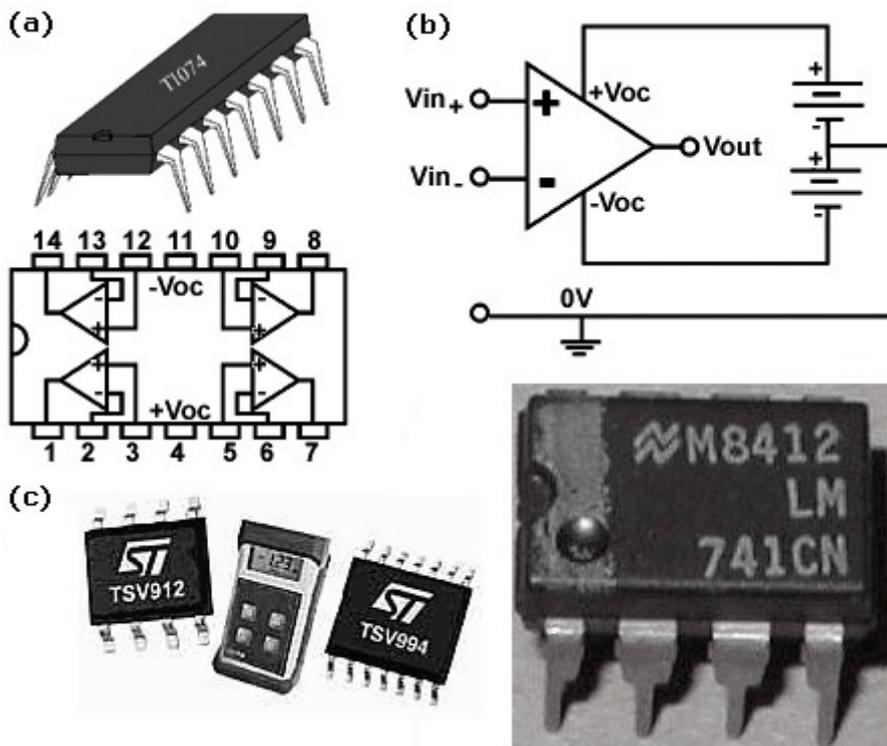
Amplificadores Operacionais

1. Introdução
2. Conceitos Básicos
3. Símbolo
4. Encapsulamento
5. Diagrama interno
6. Circuitos básicos
7. Amplificador Inversor
8. Amp. não inversor
9. Somador
10. Subtrator ou Diferencial
11. Amp. de Ganho Variável
12. Integrador
13. Diferenciador
14. Seguidor de Tensão
15. Circuitos
16. Referências

1. Introdução

O presente trabalho tem como objetivo dar início ao estudo dos Amplificadores Operacionais, trata-se de um circuito integrado que faz parte da família dos dispositivos eletrônicos lineares com larga aplicação no ramo da Eletrônica e da Instrumentação Industrial.

Nesta abordagem destacamos: conceitos básicos, características físicas, descrição do circuito interno, características elétricas, circuitos básicos e aplicativos.



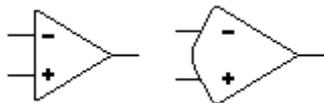
2. Conceitos Básicos

O termo Amplificador operacional é originalmente usado para descrever uma série de amplificadores de alto desempenho em corrente contínua, usado basicamente em computadores analógicos, instrumentação etc. Fazem parte dos circuitos lineares e se refere a um amplificador de alto ganho que possui rede externa de realimentação para controlar sua resposta. O amplificador ideal sem essa realimentação, isto é, em condição de malha aberta, apresenta as seguintes características:

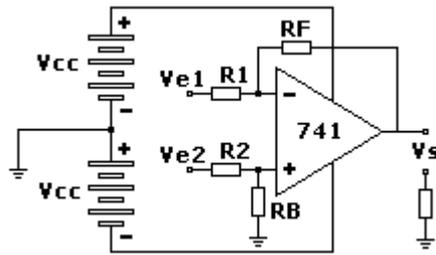
- ganho de malha aberta - infinito;
 - impedância de entrada - infinita;
 - impedância de saída - nula;
 - largura de faixa de frequência - infinita;
 - saída de tensão nula, quando a tensão de entrada for igual a zero (isto é, compensação nula).
1. ter ganho infinito: significa que qualquer sinal de entrada será infinitamente amplificado;
 2. ter impedância de entrada infinita: significa que o amplificador não consumirá nenhuma corrente da fonte de entrada;
 3. ter impedância de saída nula: significa que o amplificador será uma fonte de tensão ideal para a carga;
 4. ter largura de faixa de frequência infinita: significa que amplificará sem distorção na saída, sinais de frequências baixas até frequências extremamente elevadas;
 5. e, finalmente, ter compensação nula: significa um perfeito comparador de sinais.

3. Símbolo

O Símbolo varia dependendo da fonte de informação, os dois símbolos mais comum são mostrados a seguir, sendo o primeiro mais utilizado.



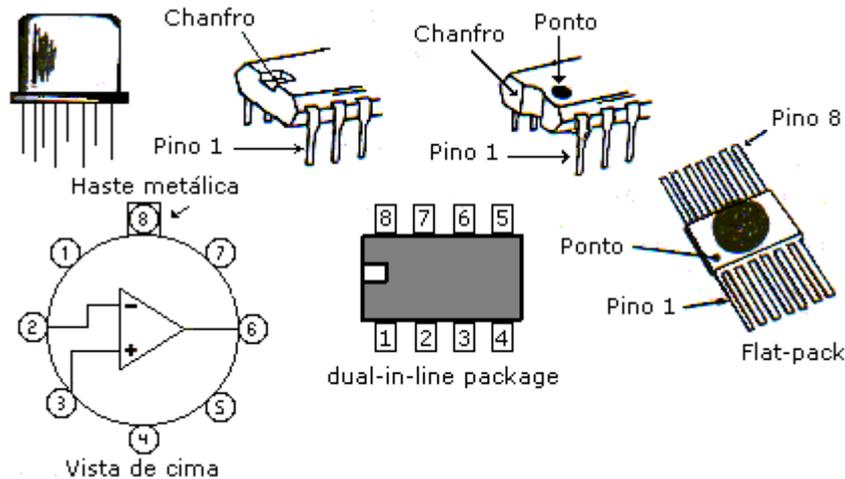
O amplificador operacional apresenta duas entradas, uma inversora (-). outra não inversora (+) e uma única saída. Normalmente o amplificador operacional é alimentado por uma fonte bipolar (simétrica), cuja faixa de tensão varia de -3 a -18 Volts para a alimentação negativa e de +3 a +18 Volts para a alimentação positiva.



As conexões elétricas da fonte geralmente são omitidas no diagrama esquemático.

4. Encapsulamento

Os amplificadores operacionais são encapsulados em unidades de reduzidas dimensões, que encerram um único "chip monolítico". Existem três tipos básicos: o encapsulamento metálico que recebe a denominação nos "data books" de TO-99, os encapsulamentos plásticos em linha dupla ou "DIP" (dual-in-line-package) e o encapsulamento plano ou "FLAT-PACK", mostrados a seguir:



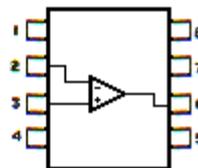
Para o amplificador operacional 741, podemos encontrar encapsulamento metálicos e DIP de 8 pinos (mais usual) e de 14 pinos. A pinagem do encapsulamento DIP de 8 pinos corresponde exatamente à pinagem do encapsulamento metálico. Encontraremos, também, encapsulamentos FLAT-PACK de 10 pinos.

Pinagem do Amplificador Operacional 741

A título de exemplo apresentaremos a seguir o desenho do encapsulamento com a função de cada pino do 741.

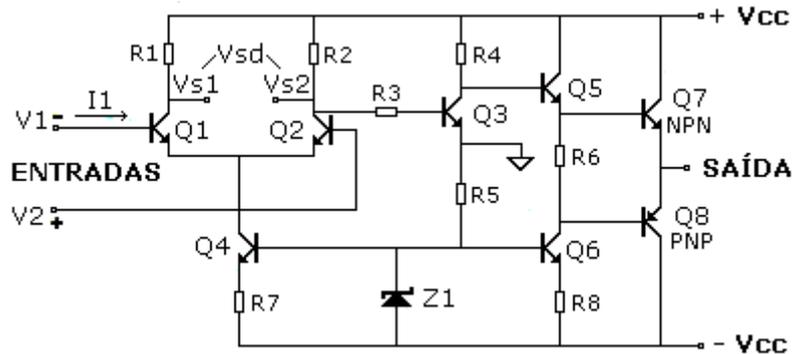
Pinagem do Amplificador Operacional 741

- 1 - Ajuste de OFFSET
- 2 - Entrada inversora (-)
- 3 - Entrada não inversora (+)
- 4 - Alimentação negativa (v-)
- 5 - Ajuste de OFFSET
- 6 - Saída
- 7 - Alimentação positiva (V+)
- 8 - NC (não conectado eletricamente)



5. Diagrama interno

Depois da pinagem, podemos finalmente fazer uma breve descrição do diagrama interno de um Amplificador Operacional, tomando como parâmetro um modelo didático, por ser genérico, uma vez que o modelo prático do diagrama interno é bem mais complexo e apresenta certas particularidades dependendo da aplicação e do fabricante.

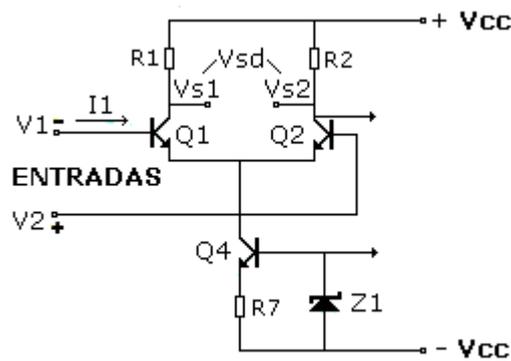


Para entendimento do diagrama interno, vamos separar este em três partes, a saber:

- Estágio diferencial de entrada - formado por um amplificador diferencial (Q1 e Q2) e uma fonte de corrente constante (Q4, R7 e o diodo zener "Z1"). A fonte de corrente constante garante a estabilidade do circuito minimizando o efeito da temperatura sobre o ponto quiescente de cada transistor (Q1 e Q2). A função de Q1 e Q2 é fornecer uma tensão CC diferencial e amplificada para o estágio seguinte.
- Estágio deslocador de nível e Amplificador Intermediário - Representado por "Q3", tem a função de proporcionar maior ganho de sinal, bem como ajustar em um referencial "zero" o nível de tensão CC proveniente do estágio anterior. Este ajuste é importante para não alterar a referência de saída do operacional, principalmente quando em operação com corrente alternada.
- Estágio Acionador de Saída - Este estágio deve proporcionar uma baixa impedância de saída e suficiente corrente para alimentar a carga especificada para o operacional. Evidente que a impedância de entrada deste estágio precisa ser alta para não carregar o estágio anterior. Normalmente, utiliza-se uma configuração do tipo seguidor de tensão para este estágio (Q5 e Q6) e para a saída geralmente transistores complementares, neste exemplo "Q7" e "Q8".

5.1. Par diferencial de entrada

Dentre os estágios aqui discutidos, o par diferencial de entrada é o estágio que mais acentua as características básicas do amplificador operacional. Em relação ao funcionamento deste estágio, podemos concluir que as saídas são obtidas entre o coletor de Q1 e o terra, (V_{s1} e V_{s2} , saídas simples). Ou entre os dois coletores, (V_{sd} , tensão de saída em modo diferencial).



Podemos expressá-las as saídas simples como:

$$v_{s1} = -\frac{\beta \cdot R1}{2h_{ie}} \cdot (v2 - v1)$$

$$v_{s2} = \frac{\beta \cdot R2}{2h_{ie}} \cdot (v2 - v1)$$

Sendo $R1=R2=R_C$, as saídas de modo diferencial (V_{sd} , entre os coletores de $Q1$ e $Q2$) terá um ganho duas vezes maior que as válidas para V_{s1} e V_{s2} isoladamente. A saída em modo diferencial será expressa por:

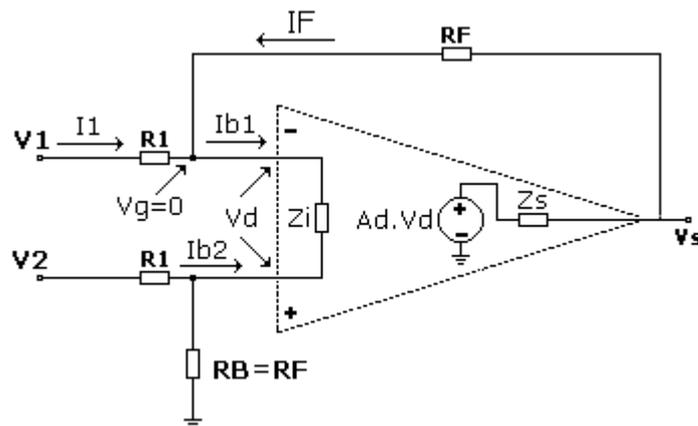
$$v_{sd} = \frac{\beta \cdot R_C}{h_{ie}} \cdot (v2 - v1)$$

Onde $V_{sd} = (V_{s1} - V_{s2})$ e h_{ie} , representa a impedância de cada transistor que forma o par diferencial de entrada do amplificador operacional.

6. Circuitos básicos

A maioria dos circuitos lineares de amplificador operacional cai em uma ou duas das configurações básicas do amplificador ou em alguma combinação delas, são geralmente descritas com amplificadores inversor e amplificadores não inversor.

A figura a seguir é um modelo simplificado de um amplificador operacional real.



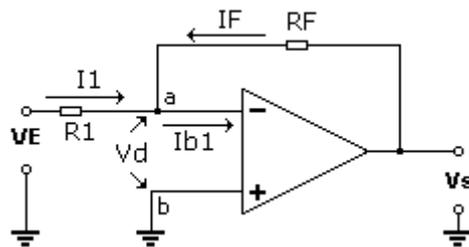
Descrição:

- R_f = Resistor de realimentação (feed back)
- V_g = Terra virtual (virtual ground)

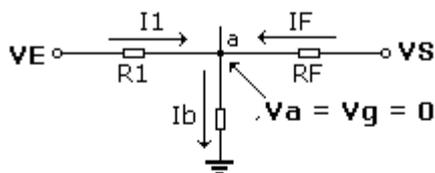
- Z_i = Impedância de entrada
- A_d = Ganho em malha aberta (intrínseco do AOP)
- V_d = Tensão de entrada diferencial
- Z_s = Impedância de saída
- i_b = Corrente de polarização de entrada $= (i_{b1} + i_{b2}/2)$

7. Amplificador Inversor

A denominação de amplificador inversor deve-se ao fato de que o sinal de saída do amplificador estará defasado 180° em relação ao sinal de sua entrada.



Analogia:



A impedância de entrada do Amp. Operacional é infinita; como resultado $I_b = 0$ e $V_a = V_g$ (terra virtual), também $= 0$.
Desenvolvendo as expressões, fica: $I_1 = I_F$

$$\frac{V_E - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_S}{R_F} \quad \frac{V_E}{R_1} = -\frac{V_S}{R_F} \quad V_S = \frac{V_E \cdot R_F}{R_1} \therefore \boxed{V_S = -\frac{R_F}{R_1} \cdot V_E}$$

Como $V_S = A_V \cdot V_E$, o ganho de tensão " A_V ", será:

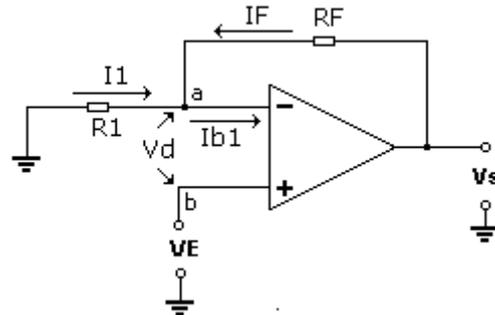
$$\boxed{A_V = -\frac{R_F}{R_1}}$$

Do exposto sobre inversor, conclui-se que:

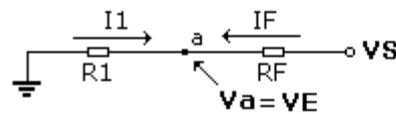
- O ganho para o inversor, neste exemplo, depende da relação do resistor de entrada (R_1) e do resistor de realimentação (R_F).
- O resistor de entrada (R_1), não pode ter seu valor de resistência muito pequena, para não comprometer sua relação com a entrada do AOP e o gerador de sinal.
- O resistor (R_F) não pode ter o valor elevado, para não provocar ruído e interferir na linearidade do circuito.

8. Amplificador não inversor

O amplificador não inversor não apresenta defasagem do sinal de saída, o sinal será aplicado à entrada não inversora do circuito.



Analogia:



Sendo $V_d = 0 \rightarrow V_a = V_e$, então:

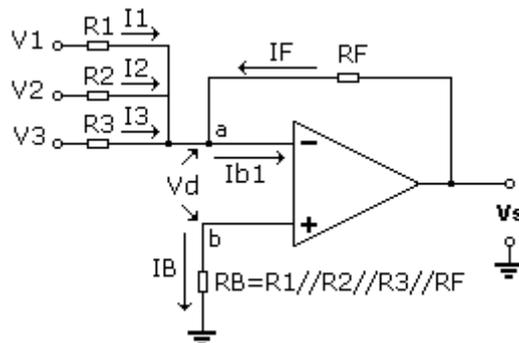
$$V_E = \frac{R_1}{R_1 + R_F} \cdot V_S \quad \dots \quad \boxed{V_S = \frac{R_1 + R_F}{R_1} \cdot V_E}$$

Como $V_S = A_V \cdot V_E$, o ganho de tensão "AV", será:

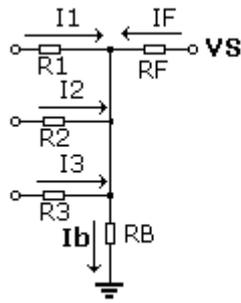
$$\boxed{A_V = \frac{R_F}{R_1} + 1}$$

9. Somador

O amplificador inversor pode ser usado para formar a soma algébrica de várias voltagens de entrada com cada entrada modificada por um fator de escala desejado. Sendo assim podemos superpor vários sinais para obter uma forma de onda desejada, podendo por exemplo, obter na saída a média ponderada dos sinais de entrada.



Analogia:



$$I1 + I2 + I3 + IF = IB \quad \therefore \quad IB = 0$$

$$\frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} + \frac{V3}{R3} + \frac{Vs}{RF} = 0$$

$$-\frac{Vs}{RF} = \frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} + \frac{V3}{R3}$$

$$Vs = -\left(\frac{RF \cdot V1}{R1} + \frac{RF \cdot V2}{R2} + \frac{RF \cdot V3}{R3}\right)$$

Casos que merecem destaque:

Para "N" entradas

$$Vs = -\left(\frac{RF}{R1} \cdot V1 + \frac{RF}{R2} \cdot V2 + \dots + \frac{RF}{RN} \cdot VN\right)$$

Para "R" de entradas iguais

$$Vs = -\frac{RF}{R1} (V1 + V2 + \dots + VN)$$

Para todos os resistores iguais

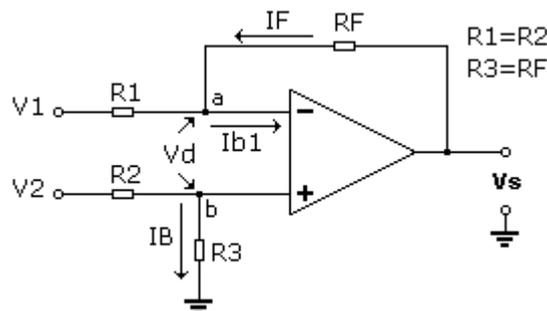
$$Vs = -(V1 + V2 + \dots + VN)$$

Para $R1 = R2 = R3 = 3RF$

$$Vs = -\left(\frac{V1 + V2 + V3}{3}\right)$$

10. Amplificador Subtrator ou Diferencial

Este circuito é um amplificador que tem inúmeras aplicações na área de Instrumentação, permite que se obtenha na saída uma tensão igual a diferença entre os sinais aplicados em cada uma das entradas $V1$ e $V2$, multiplicadas por um ganho.



Analogia:

Um sinal é aplicado à entrada $V1$ enquanto outro é aplicado à entrada $V2$, portanto, aplicados em modo diferencial; se o circuito estivesse em malha aberta a expressão para a tensão de saída seria:

$$Vs = Ad \cdot Vd$$

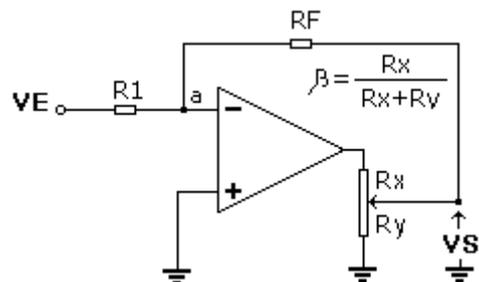
Onde "Ad" representa o ganho diferencial para o circuito em malha aberta, que é infinito. Porém, neste exemplo temos um circuito em malha fechada (realimentado), então o ganho desta configuração se expressa como "RF/R1" e "Vd" representa a tensão de entrada diferencial que se expressa como (V2 - V1).

Substituindo na expressão, os dados do circuito em malha aberta por dados do circuito em malha fechada, a expressão de saída para este circuito fica:

$$v_s = \frac{R_F}{R_1} \cdot (v_2 - v_1)$$

11. Amplificador de Ganho Variável

Para ganhos mais elevados sem interferir na estabilidade do circuito, acrescenta-se um potenciômetro à saída do amplificadores inversor de modo a formar um divisor de tensão e então teremos um amplificador de ganho variável.



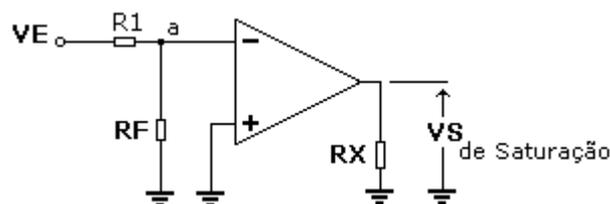
Analogia:

A parcela realimentada é $\beta = \frac{R_Y}{R_X + R_Y}$

$$v_s' = \beta \cdot v_s \longrightarrow v_s' = \frac{R_Y}{R_X + R_Y} \cdot \left(-\frac{R_F}{R_1} \cdot v_E\right)$$

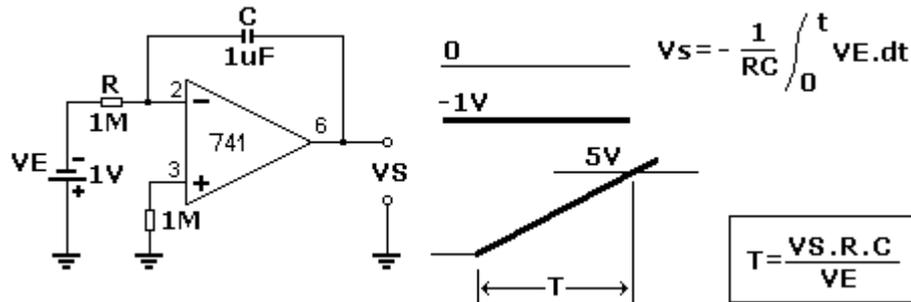
Casos que merecem destaque:

1. Para $R_X = 0 \rightarrow \beta = 1 \rightarrow v_s' = -\frac{R_F}{R_1} \cdot v_E \rightarrow = v_s$
2. Para $R_X = R_Y \rightarrow \beta = 1/2 \rightarrow v_s' = 1/2 \cdot v_s$
3. Para $R_Y = 0 \rightarrow \beta = 0 \rightarrow$ Saturação

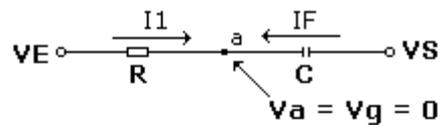


12. Integrador

O integrador é um dos circuitos mais importantes envolvendo amplificadores operacionais.



Analogia:



Comparação com o amplificador inversor:

$$I_1 = \frac{V_E - 0}{R} \quad \text{e} \quad I_F = i \text{ no capacitor} = \frac{Q}{t}$$

$$\text{Como } I_1 = I_F, \text{ fica: } \frac{V_E}{R} = \frac{Q}{t} \quad \therefore Q = V_S \cdot C$$

$$\frac{V_E}{R} = \frac{V_S \cdot C}{t} \quad V_S \cdot C \cdot R = V_E \cdot t \quad \boxed{V_S = - \frac{V_E \cdot t}{RC}}$$

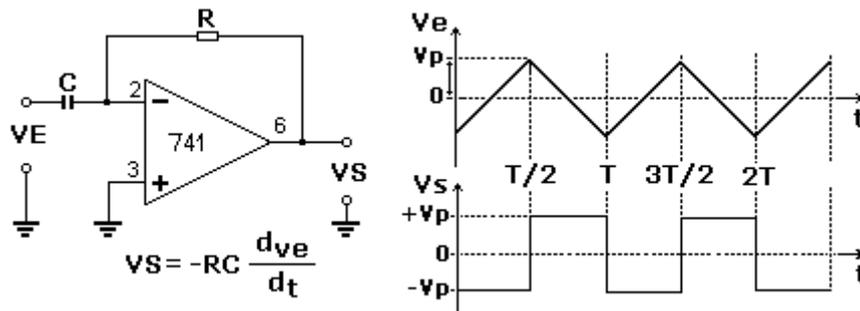
No instante em que é aplicado o sinal de entrada "Ve", o capacitor não carrega-se instantaneamente, e de início será como um curto-circuito. O ganho do amplificador será nulo. A medida que o capacitor for se carregando se aproxima de um circuito aberto, o ganho também irá aumentando até atingir o valor infinito (saída saturada).

Se o sinal de entrada for um (degrau) a saída será uma (rampa). Um valor muito importante é o tempo que o sinal de saída leva para atingir um determinado nível. Esse tempo pode ser aproximado pela seguinte expressão:

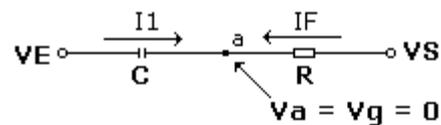
$$T = \frac{V_S \cdot R \cdot C}{V_E}$$

13. Diferenciador

Este circuito apresenta uma saída proporcional à taxa de variação do sinal de entrada.



Analogia:



Comparação com o amplificador inversor:

$$I_1 = I_C = \frac{Q}{t} \quad I_F = \frac{V_S - 0}{R}$$

Como $I_1 = I_C = I_F$, fica: $\frac{Q}{t} = \frac{V_S}{R}$

$$V_S \cdot t = Q \cdot R \quad V_S = -\frac{Q \cdot R}{t} \quad \therefore Q = V_E \cdot C$$

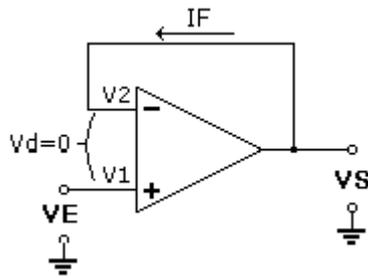
$$V_S = -\frac{V_E \cdot R \cdot C}{t}$$

O circuito diferenciador faz exatamente a operação oposta do integrador. Se o sinal de entrada "Ve" for uma (rampa) a saída "Vs" será um (degrau).

14. Seguidor de Tensão

O seguidor de Tensão é um circuito que apresenta uma impedância de entrada extremamente elevada e uma impedância de saída extremamente baixa, conforme expressa o próprio símbolo do amplificador operacional, por isso, muitas aplicações utilizam-se desta propriedade; dentre as aplicações, citamos:

- => Isolador de estágios
- => Reforçador de corrente
- => casador de impedância



Analogia:

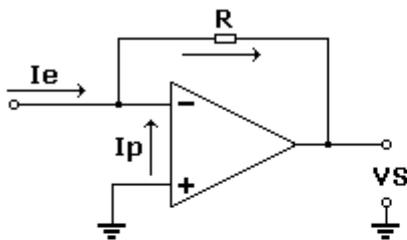
A tensão na entrada diferencial do circuito é igual a zero ($V_d=0$). Como toda a saída está realimentada, circuito em malha fechada, a tensão de saída " V_s " é igual a " V_2 " e por outro lado " V_2 " é igual a " V_1 "; fazendo com que a tensão de saída " V_s " seja igual à tensão de entrada " V_e ". O ganho de tensão para esta configuração é unitário, uma vez que ($A_v=V_s/V_e$).

15. Circuitos

Para dar exemplos de aplicativos com amplificadores operacionais, selecionamos alguns circuitos de corrente e tensão. São circuitos em que os sinais de entrada e saída são correntes. Eles nos serão úteis em várias aplicações, dentre as quais destacamos a confecção de fontes de corrente e de medidores. Também é possível a construção de conversores corrente/tensão e tensão/corrente.

Aplicação 1 - Conversor corrente/tensão

a) Circuito básico



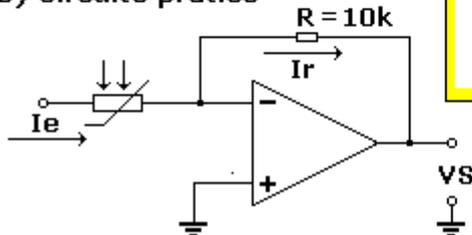
Analogia:

$$V_s = (I_e + I_p) \cdot R$$

sendo I_p desprezível, fica:

$$V_s = I_e \cdot R$$

b) Circuito prático

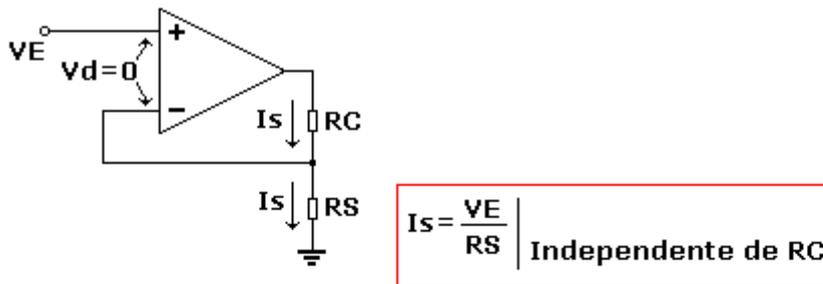


Analogia:

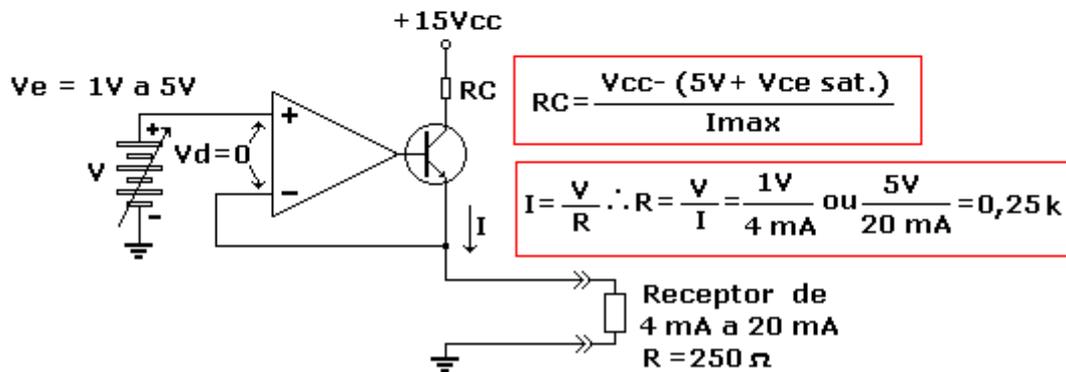
sendo $I_e = I_r$
 $\Delta V_s = \Delta I_e \cdot R \therefore I_e = I_{LDR}$,
 que corresponde a intensidade
 de luz incidente no LDR.

Aplicação 2 - Conversor tensão/corrente (1..5v para 4..20 mA)

a) Circuito básico

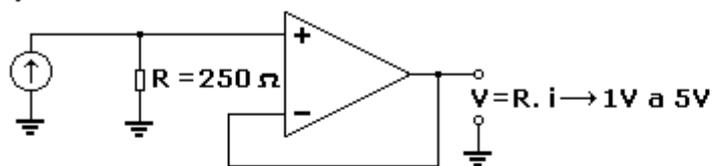


b) Circuito prático

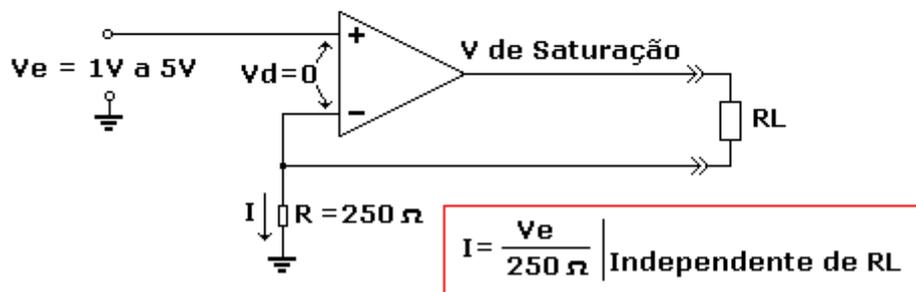


Aplicação 3 - Conversor corrente/tensão (4..20 mA para 1..5V)

a) Circuito básico



b) Circuito prático



16. Referências

ALMEIDA, Antônio Carlos de. **Caderno de Anotações**. Salvador: SENAI/CEFET, 1978/2008.

CIPELLI, Antonio Marco Vicari; SANDRINI, Waldir João. **Teoria e desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**. São Paulo - Brasil: Érica, 1979.

LOWENBERG, Edwin C. **Circuitos Eletrônicos**. (Tradução: Ostend. A. Cardim). São Paulo - Brasil: McGraw-Hill do Brasil, 1974.

MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica - volume 1**. (Tradução: José Lucimar do Nascimento; revisor técnico: Antonio Pertence Junior). 4ª ed. São Paulo - Brasil: Makron Books, 1995.

KAUFMAN, Milton. **Eletrônica Básica**. (Tradução: Fausto Martins Pires Júnior). São Paulo - Brasil: McGraw-Hill do Brasil, 1984.

Última atualização - 25.04.2006

Autor: Antonio Carlos de Almeida
URL: www.almhpg.com
e-mail: tonical@almhpg.com
Postado em: 14/10/2014