

## Estudo do Amplificador Operacional

### Introdução

O amplificador operacional é certamente um dos circuitos integrados de aplicações lineares mais usados e mais versáteis em eletrônica. Além de ser de fácil emprego, ele não requer cálculos cansativos e ajustes para sua polarização, ao contrário dos transistores.

O amplificador operacional recebeu esta denominação pelo fato de ter sido utilizado inicialmente para executar operações matemáticas em computação analógica, tais como somar, subtrair, integrar, diferenciar etc.

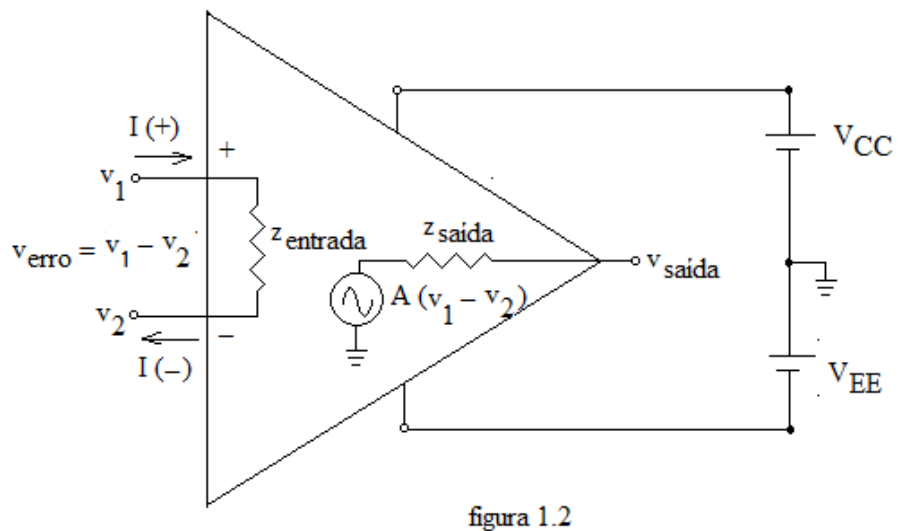
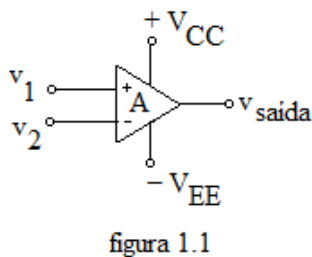
Atualmente, o componente em forma de circuito integrado é empregado em um sem-número de aplicações lineares e não-lineares na eletrônica em geral, mas principalmente em sistemas de controle e regulação, instrumentação eletrônica, processamento e geração de sinais.

Em 1965 a “Fairchild Semiconductor” apresentou o  $\mu A709$ , o primeiro amplificador operacional monolítico (montado sob um mesmo substrato) amplamente usado. Embora altamente bem sucedido, esta primeira geração de amplificadores operacionais teve muitas desvantagens. Isto levou a um amplificador operacional melhorado conhecido como  $\mu A741$ . Pelo fato dele ser barato e fácil de ser utilizado, o  $\mu 741$  foi um enorme sucesso. Até hoje este amplificador operacional ocupa posição de destaque, apesar de existirem hoje diversos amplificadores operacionais com características superiores às do  $\mu 741$ .

### Simbologia e Terminologia

Como símbolo do amplificador operacional costuma-se usar um triângulo, apontando no sentido do fluxo do sinal. Na base do triângulo apresentam-se os dois terminais diferenciais de entrada e no ápice, o terminal único de saída. A figura 1.1 mostra tal simbologia e a figura 1.2 mostra a mesma simbologia acrescentada de alguns elementos que compõem o amplificador operacional.

O circuito de entrada do amplificador operacional é o amplificador diferencial composto de duas entradas e saída simples.



Descrição:

Os terminais  $+V_{CC}$  e  $-V_{EE}$  são para polarização do componente, raramente são mostrados, mas são sempre implícitos.

“ $v_1$ ” é o terminal da entrada não inversora. É sempre marcado com o sinal (+).

“ $v_2$ ” é o terminal da entrada inversora. É sempre marcado com o sinal (-).

“A” representa o ganho de tensão diferencial, também conhecido como ganho de tensão de malha aberta.

“ $Z_{\text{entrada}}$ ” representa a impedância de entrada do amplificador operacional.  
“ $Z_{\text{saída}}$ ” representa a impedância de saída do amplificador operacional.  
“ $V_{\text{saída}}$ ” representa a tensão obtida na saída do amplificador operacional.  
“ $V_{\text{erro}}$ ” representa a tensão que o amplificador operacional irá amplificar, ou seja,  $v_1 - v_2$ .  
“ $I(+)$ ” e “ $I(-)$ ” são as correntes nas entradas do amplificador operacional.

Normalmente os amplificadores operacionais são projetados para serem alimentados simetricamente. O ponto comum das fontes será o terra do circuito, ou seja, todas as tensões presentes nos terminais do amplificador operacional terão como referência este ponto comum das fontes.

## Os Parâmetros do Amplificador Operacional Ideal

Os amplificadores operacionais atuais, em forma de circuito integrado, são capazes de efetuar muitas funções complexas com grande precisão e alto grau de confiabilidade. Para que isso seja possível, deve a unidade amplificadora apresentar parâmetros que tendem ao ideal. Tais parâmetros ideais são apresentados a seguir:

Impedância de entrada  $Z_{\text{entrada}} = \infty$

Impedância de saída  $Z_{\text{saída}} = 0$

Ganho de tensão de malha aberta  $A = \infty$

Defasagem estável entre entrada e saída de  $180^\circ$

Banda de passagem  $B = \infty$

Ganho de tensão do modo comum  $A_{(\text{MC})} = 0$

Correntes de entradas  $I(+)\approx I(-) = 0$

Tensão de erro  $V_{\text{erro}} = v_1 - v_2 = 0$

Ruído de entrada = 0

Taxa de inclinação (SR – Slew Rate) =  $\infty$ . O atraso entre a resposta do amplificador na saída e a excitação nas entradas deve ser nula.

Tensão de offset de saída = 0. Isto é, a tensão de saída deve ser nula se as tensões nas entradas forem nulas.

Características constantes ao longo prazo e para condições ambientais diferentes.

## O Amplificador Operacional 741 Como Padrão Industrial

O amplificador operacional 741 tornou-se o padrão industrial. Como regra, primeiro se tenta usá-lo nos projetos. Nos casos em que não atingir as especificações pretendidas passará para um amplificador operacional com características mais adequadas ao projeto envolvido.

A figura 2 mostra a pinagem do amplificador operacional 741.

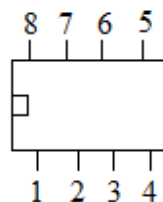


figura 2

Os pinos 1 e 5 são usados para fazer o ajuste de offset do componente.

O pino 2 é a entrada inversora.

O pino 3 é a entrada não inversora.

O pino 6 é a saída do operacional.

O pino 7 é da alimentação positiva ( $V_{\text{CC}}$ ) e o pino 4 é da alimentação negativa ( $V_{\text{EE}}$ ).

O pino 8 não tem função (não conectado).

Os valores típicos dos parâmetros do amplificador operacional 741 são listados a seguir:

Impedância de entrada  $z_{\text{entrada}} = 2\text{M}\Omega$

Impedância de saída  $z_{\text{saída}} = 75\Omega$

Ganho de tensão de malha aberta  $A = 100000$

Defasagem estável entre entrada e saída de  $180^\circ$

Banda de passagem B = frequência unitária =  $1\text{MHz}$

Frequência de corte superior de malha aberta =  $10\text{Hz}$

Razão de Rejeição do Modo Comum em dB =  $90\text{dB}$

Corrente de polarização  $I_{(\text{polarização})(\text{entrada})} = 80\text{nA}$

Corrente de compensação = Corrente de offset  $I_{(\text{compensação})(\text{entrada})} = 20\text{nA}$

Tensão de compensação de entrada = Tensão de offset de entrada =  $V_{(\text{compensação})(\text{entrada})} = 2\text{mV}$

Máxima corrente de saída  $I_{(\text{saída})\text{ máxima}} = 25\text{mA}$

Taxa de inclinação (SR – Slew Rate) =  $0,5\text{V}/\mu\text{s}$ .

### Diagrama Esquemático Simplificado do Amplificador Operacional 741

A figura 3 mostra um diagrama esquemático simplificado do amplificador operacional do 741. Este circuito é equivalente ao do 741 e de muitas gerações posteriores de amplificadores operacionais.

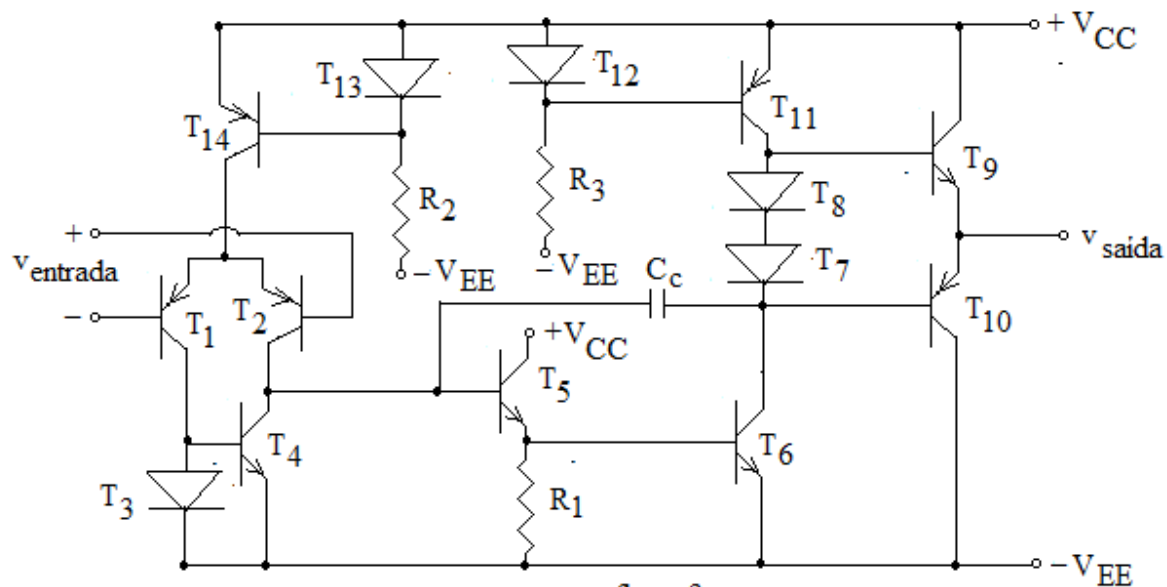


figura 3

Para se obter um alto valor para razão de rejeição do modo comum (CMRR), um espelho de corrente (T13, T14) produzirá a corrente de cauda do amplificador diferencial (T1 e T2). Além disso, para se obter o ganho de tensão mais alto possível com o amplificador diferencial, se usará como carga um espelho de corrente (T3 e T4).

A saída do amplificador diferencial (coletor de T2) alimenta um transistor na configuração coletor comum (T5). O sinal que sai de T5 alimenta o transistor T6, que é um acionador classe B.

O último estágio é um seguidor do emissor push-pull classe B (T9 e T10). Devido à alimentação dividida (tensões positiva e negativa iguais), a saída quiescente é idealmente de 0 Volt quando as tensões de entrada são iguais a zero; qualquer desvio de 0 Volt é chamada tensão de compensação de saída. T11 e T12 formam uma carga de espelho de corrente para o acionador classe B.

O capacitor  $C_c$  é chamado de capacitor de compensação. Este capacitor (tipicamente de  $30\text{pF}$ ) tem um efeito pronunciado na resposta em frequência do amplificador operacional.  $C_c$  faz parte de uma rede de atraso (filtro passa baixa) que após a frequência de corte do filtro faz com que o sinal de saída sofra uma atenuação de 20 decibéis por década.  $C_c$  é necessário para evitar oscilações (sinal indesejado produzido no amplificador).

## Características do Amplificador Operacional

Tensão de compensação de entrada  $V_{(\text{compensação})(\text{entrada})}$

Quando as entradas de um amplificador operacional são aterradas, quase sempre há uma tensão de compensação de saída porque os transistores de entrada tem valores de  $V_{BE}$  diferentes. A tensão de compensação de entrada é igual a esta diferença dos valores de  $V_{BE}$ . Ao se aplicar em uma das entradas uma tensão contínua com o valor da tensão de compensação de entrada do componente se zera a tensão de compensação de saída.

Corrente de compensação de entrada

As correntes da base dos transistores de entrada quase nunca são iguais porque os valores de  $\beta_{CC}$  dos transistores geralmente são diferentes. A corrente de compensação de entrada é igual á diferença das correntes de base. Portanto, mesmo que usemos resistores iguais nas entradas do operacional, a corrente de compensação da entrada pode produzir uma diferença de tensão indesejável na entrada. Esta tensão amplificada aparecerá na saída do operacional para produzir a tensão de compensação de saída.

O uso de realimentação negativa nos circuitos com operacional reduz na saída do circuito o efeito da tensão de compensação de entrada.

Razão de rejeição do modo comum

A razão de rejeição do modo comum é a razão entre o ganho de tensão diferencial é o ganho de tensão do modo comum. Dados dois sinais iguais, sendo um que deve ser amplificado e o outro deve ser atenuado, no 741 o CMRR sendo do 90 dB, significa que o sinal a ser amplificado será 30000 vezes maior na saída do que o sinal do modo comum. A frequência influencia esta característica, de forma que ele reduz seu valor a medida que a frequência é aumentada.

Compliance ca de saída

A compliance ca de saída (PP) é a tensão de saída máxima de pico a pico não ceifado que um amplificador operacional pode produzir. Como a saída quiescente é zero, idealmente a tensão de saída pode excursionar para a parte negativa e positiva. Por exemplo, se  $V_{CC} = +15\text{ V}$  e  $V_{EE} = -15\text{ V}$ , a tensão máxima de pico a pico não ceifada com uma resistência de carga de  $10\text{k}\Omega$  é aproximadamente 27 V.

Máxima corrente de saída

Como o 741 tem uma impedância de saída de somente  $75\ \Omega$  com isso ele só consegue fornecer no máximo uma corrente de 25 mA na saída dele. Um amplificador operacional é um dispositivo de baixa potência, e dessa forma a sua corrente de saída é limitada.

Resposta em frequência

A realimentação negativa significa ter que reduzir o ganho de tensão porém provoca menor distorção de sinal e aumento na largura de banda do circuito. Quando um amplificador operacional usa realimentação negativa, a operação é chamada malha fechada. O amplificador operacional sem realimentação negativa, é conhecido como malha aberta.

O capacitor  $C_c$  na estrutura interna do amplificador operacional provoca uma rede atraso, ou seja, um filtro passa baixa. Isto significa que a medida que a frequência aumenta haverá uma redução no ganho de tensão de malha aberta do operacional.

A figura 4 mostra uma rede de atraso RC. É possível se encontrar a relação entre a tensão de saída em função da tensão de entrada e dos componentes do circuito e expressar esta relação em função da frequência.

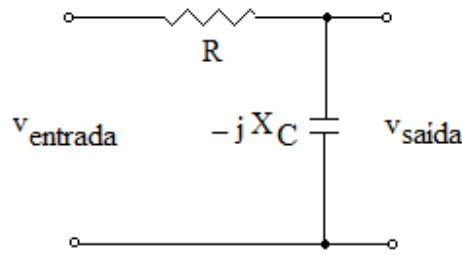


figura 4

$$v_{\text{saída}} = [(-jX_C) / (R - jX_C)] v_{\text{entrada}}$$

$$X_C = 1 / \omega C$$

$$\omega = 2\pi f_{\text{entrada}}$$

$$f_{\text{corte}} = 1 / 2\pi RC$$

$$2\pi RC = 1 / f_{\text{corte}}$$

$$-j = 1 / j$$

$$v_{\text{saída}} = [(1 / j2\pi f_{\text{entrada}} C)] / [(R + 1 / j2\pi f_{\text{entrada}} C)] v_{\text{entrada}}$$

$$v_{\text{saída}} = [(1 / j2\pi f_{\text{entrada}} C)] / [(1 + j2\pi f_{\text{entrada}} RC) / j2\pi f_{\text{entrada}} C] v_{\text{entrada}}$$

$$v_{\text{saída}} = 1 / (1 + j2\pi f_{\text{entrada}} RC) v_{\text{entrada}}$$

$$v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} = 1 / (1 + j2\pi f_{\text{entrada}} RC)$$

$$v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}} = 1 / [1 + j f_{\text{entrada}} / f_{\text{corte}}]$$

$$|v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = |1 / [1 + j f_{\text{entrada}} / f_{\text{corte}}]|$$

$$|v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1 / \sqrt{1 + (f_{\text{entrada}} / f_{\text{corte}})^2}$$

$$\text{Se } f_{\text{entrada}} = 0,1 f_{\text{corte}} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1 / \sqrt{1 + (0,1 f_{\text{corte}} / f_{\text{corte}})^2} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1$$

$$\text{Se } f_{\text{entrada}} = f_{\text{corte}} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1 / \sqrt{1 + (f_{\text{corte}} / f_{\text{corte}})^2} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1 / \sqrt{2} \approx 0,707$$

$$\text{Se } f_{\text{entrada}} = 10f_{\text{corte}} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1 / \sqrt{1 + (10f_{\text{corte}} / f_{\text{corte}})^2} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| \approx 1 / \sqrt{100} \approx 0,1$$

$$\text{Se } f_{\text{entrada}} = 100f_{\text{corte}} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| = 1 / \sqrt{1 + (100f_{\text{corte}} / f_{\text{corte}})^2} \rightarrow |v_{\text{saída}} / v_{\text{entrada}}| \approx 0,01$$

Da análise feita anteriormente se percebe que após a frequência de corte o ganho de tensão da rede cai numa proporção bem conhecida: Cada vez que a frequência de entrada aumenta de 10 vezes em relação ao valor anterior, o ganho do circuito cai de 10 vezes em seu valor. Isto é o que se conhece como o decaimento do filtro passa baixa (rede RC). Se transformar essa relação em dB se diz que o filtro após a frequência de corte cai na razão de 20 dB por década.

Este fenômeno também aparece no amplificador operacional só que começando com valor muito elevado no ganho de tensão de malha aberta do operacional pois ele é um amplificador por sua própria natureza. No 741 o ganho de tensão de malha aberta começa com um valor de 100000 e vai

caindo na razão de 20 dB por década. A figura 5 mostra a curva da resposta em frequência para o amplificador operacional 741.

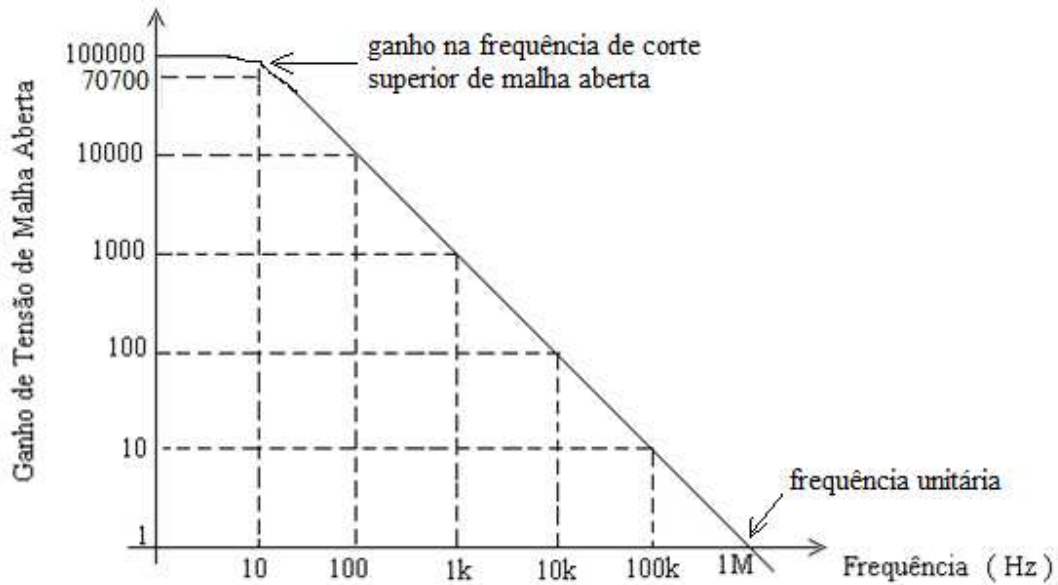


figura 5

#### Taxa de inclinação (Slew Rate)

De todas as especificações que afetam a operação com sinal variante no tempo de um amplificador operacional, a taxa de inclinação é uma das mais importantes porque ela limita o valor da tensão de saída em altas frequências. Ela é provocada pelo capacitor de compensação que está dentro do amplificador operacional. O capacitor provoca uma defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada provocando a modificação na forma de onda do sinal de saída, ou seja, o sinal de saída sai distorcido.

As limitações por taxa de inclinação são provocadas pela incapacidade das correntes internas de carregarem a capacitância de compensação do operacional.

No caso ideal tem-se que  $SR = \infty$ , o que significa que a tensão de saída variará instantaneamente para uma variação instantânea de tensão na entrada, isto é, o tempo de resposta é igual a zero. Usa-se como sinal de teste, geralmente, um degrau de tensão de entrada. Como na prática a taxa de inclinação é de um valor finito, haverá um atraso na resposta, ocorrendo uma distorção no sinal de saída.

A corrente num capacitor é dada por:  $i_c = C \, dV / dt$ . Pode-se rearranjar esta equação para obter:  $dV / dt = i_c / C$ . Isto afirma que a taxa de variação da tensão é igual à corrente do capacitor dividida pela capacitância.

A figura 6.1 apresenta a limitação da corrente num capacitor e seus efeitos sobre a tensão de saída. Uma corrente  $I_{\text{máxima}}$  carrega o capacitor. Pelo fato desta corrente ser constante, a tensão do capacitor aumenta linearmente, como mostra a figura 6.2. A taxa de variação da tensão com relação ao tempo é  $dV_{\text{saída}} / dt = I_{(\text{máxima})} / C_c$ .

A taxa de inclinação SR é definida como a taxa máxima de variação da tensão de saída. Por isso, pode-se reescrever a equação anterior como:  $dV_{\text{saída}} / dt = SR = I_{(\text{máxima})} / C_c$ .

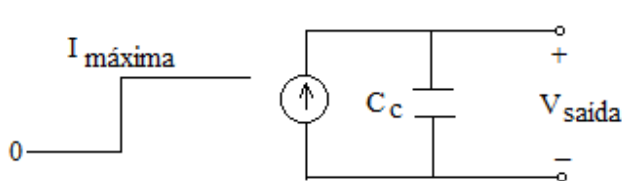


figura 6.1

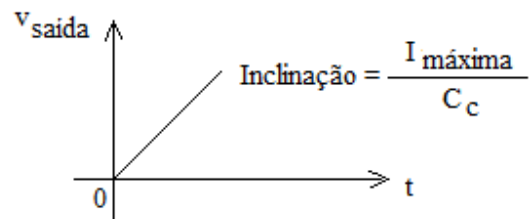


figura 6.2

Se o amplificador operacional 741 for alimentado com um degrau na entrada, a saída se inclinará com uma inclinação que corresponde a taxa de inclinação do operacional no caso,  $0,5 \text{ V} / \mu\text{s}$ . Tal situação é mostrada nas figuras 7.1 e 7.2. A tensão de saída varia na razão de  $0,5 \text{ V}$  para cada  $1 \mu\text{s}$  de tempo, ou seja,  $\Delta V_{\text{saída}} = 0,5 \text{ V}$  e  $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ . A tensão de saída não pode variar mais rápido do que o estipulada pela taxa de inclinação do componente.

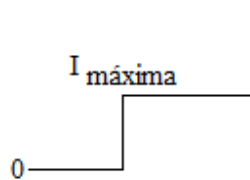


figura 7.1

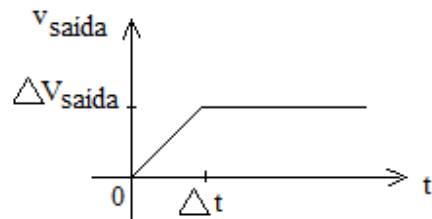


figura 7.2

Também pode-se ter uma limitação da taxa de inclinação com um sinal senoidal injetado na entrada do circuito. Desde que a inclinação inicial da onda senoidal seja menor ou igual a SR, tem-se a distorção produzida pela taxa de inclinação do amplificador operacional. A saída começa a parecer triangular; quanto mais alta a frequência, menor a oscilação e mais triangular a forma de onda que aparece na saída do circuito. A expressão colocada abaixo mostra a relação entre a máxima frequência do sinal senoidal, sua amplitude máxima na saída e a taxa de inclinação do operacional.

$$f_{\text{máxima}} = \text{SR} / 2\pi V_{\text{pico(saída)}}$$

onde:  $f_{\text{máxima}}$  = frequência mais alta não distorcida

SR = taxa de inclinação do amplificador operacional

$V_{\text{pico(saída)}}$  = Pico da onda senoidal de saída.