

Amplificadores operacionais

O termo se refere a um amplificador multi-estágios em um único C.I. (de corrente contínua) de alto desempenho, tendo o controle de suas respostas realizadas por redes externas de realimentação. Basicamente ele deve ser alimentado com fontes simétricas, mas pode ser unipolar.

O amplificador de tensão ideal é aquele sob circunstâncias de malha aberta. Suas características ideais são :

A_{vo} - Ganho de tensão em malha aberta : infinita

Z_{in} , R_i - Impedância de entrada : infinita

Z_{out} , R_o - Impedância de saída : nula

BW - Largura de faixa de frequência (Bandwidth): infinita

V_o – Tensão de Saída

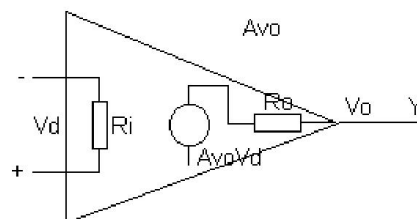
V_d – Tensão diferencial de entrada

$A_{vo}V_d$ – Fonte de tensão controlada por tensão

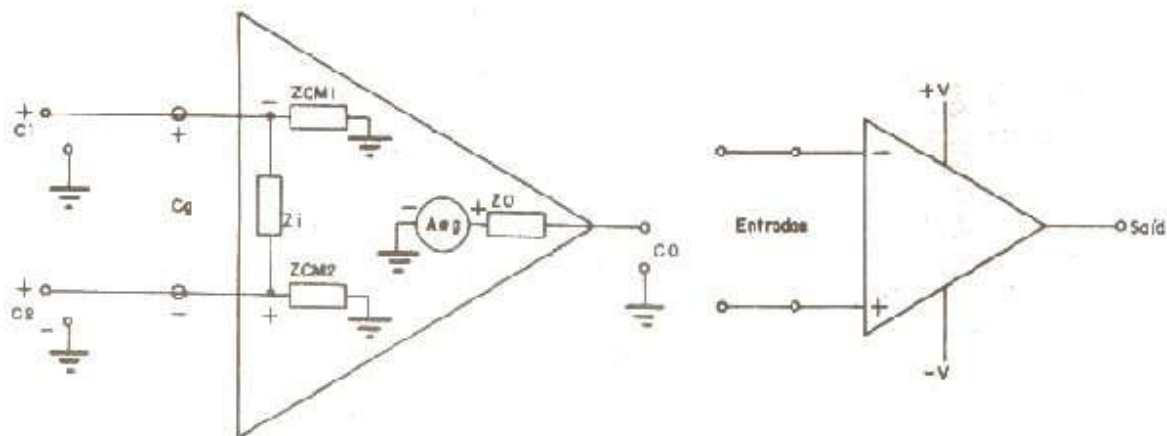
Tensão de Saída para entrada zero (Offset) ($V_1 = V_2$) : nula

Atraso : nulo

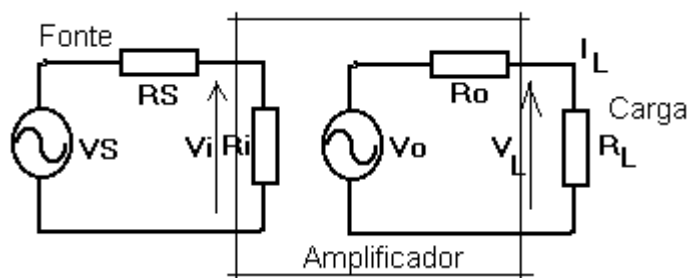
Insensibilidade a temperatura (Drift nulo)



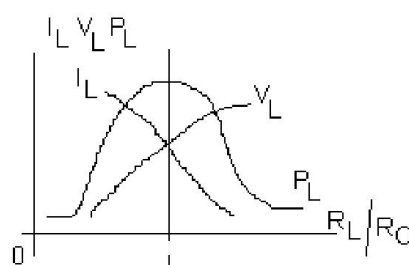
Estrutura interna em bloco (versão simplificada)



Verificação : Tomemos como referência o circuito abaixo (que representa o modelo de uma fonte alimentando um amplificador, o qual, por sua vez, alimenta uma carga)



Da teoria de circuitos lineares :



Por outro lado $V_i = (V_s / (R_s + R_i)) * R_i$

Arbitrando $R_i = 9R_s \Rightarrow V_i = 90\% V_s$

Arbitrando $R_i = 99R_s \Rightarrow V_i = 99\% V_s$, portanto se R_i tender a infinito, V_i tenderá para V_s . Logo, para minimizarmos a atenuação do sinal aplicado na entrada do amplificador é necessário que a resistência de entrada do amplificador seja muito alta, em relação a resistência de saída da fonte.

Para se obter todo sinal amplificado sobre a carga é necessário que a resistência de saída do amplificador seja muito baixa, pois $V_L = V_o - R_o \cdot I_L$. Supondo $R_o = 0$, teremos $V_L = V_o$.

Nota : no caso dos AO reais a corrente na carga é limitada por R_L (valor típico 2K). No caso do AO 741 $I_L = 25\text{mA}$, sendo conhecido como corrente de curto circuito de saída – I_{OS} .

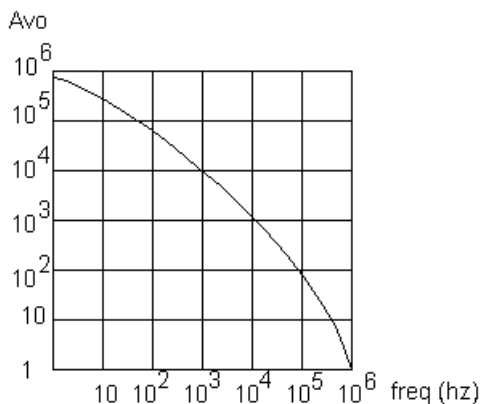
Resposta de Frequência (BandWidth = BW)

Estabelece a faixa de frequências (banda) que o AO é capaz de amplificar com ganho de malha fechada constante.

$$BW = f_c / A_{vf}, \text{ onde :}$$

f_c = frequência de ganho unitário do AO em malha aberta (frequência de corte)

A_{vf} = ganho de malha fechada do AO



Exemplo : Dada a curva de resposta de frequência em malha aberta de um típico A.O.

Suponha que o ganho de malha fechada seja $A_{vf} = 100$

$BW = 100\text{kHz}$ (tirado do gráfico)

Por outro lado, de acordo com a fórmula

$$BW = f_c / A_{vf} = 1\text{MHz} / 100 = 100\text{kHz}$$

Obs pessoal : conforme aumentamos a frequência de corte reduzimos o ganho.

É possível obtermos a BW através do Rise-Time $BW = 0,35 / TR(\text{useg})$

Slew Rate (S.R.) – Velocidade de resposta

É a máxima taxa de variação da tensão de saída por unidade de tempo; fornece uma medida da velocidade de resposta de um A.O. $S.R. = 2 * \pi * f * V_m$, onde

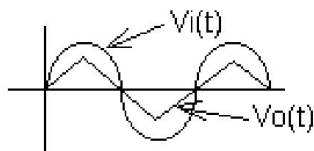
f = frequência do sinal a ser amplificado

V_m = valor máximo do sinal na saída sem distorção

Verificação : suponha que o sinal de saída de um A.O. seja $V_o(t) = V_m \cdot \sin \omega t$.

De acordo com a definição de S.R.

$$SR = \left. \frac{dV_o(t)}{dt} \right|_{\text{máx}} = W \cdot V_m \cdot \cos \omega t \Big|_{\text{máx}} = W \cdot V_m = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m$$

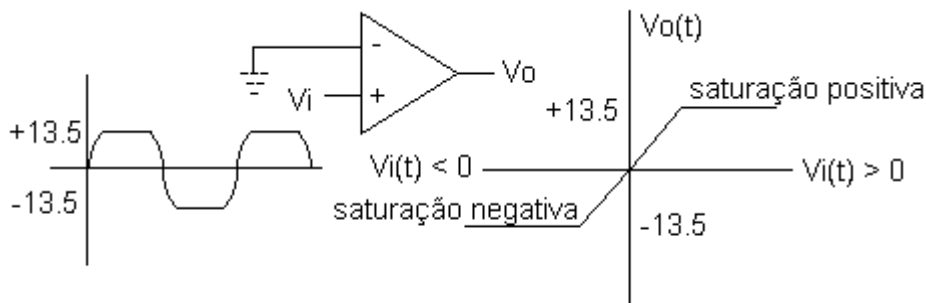


nota : o slew-rate estabelece um compromisso entre as variáveis f e V_m . Caso não observemos este fato, o sinal de saída poderá sofrer uma distorção acentuada.

Saturação dos A.O.

Quando um A.O. atingir na saída um nível de tensão fixo, a partir do qual não se pode mais aumentar sua amplitude, dizemos que o A.O. está saturado.

Ex : A.O. saturado ($V_{cc} = \pm 15$ volts)



Nota : na prática, normalmente, o nível de saturação é de aproximadamente 90% da $\pm V_{cc}$.

Ruídos nos A.O.

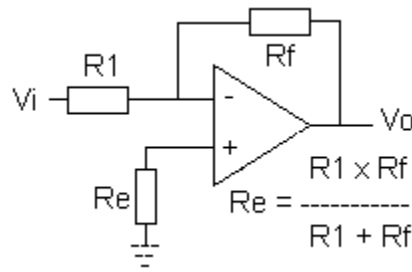
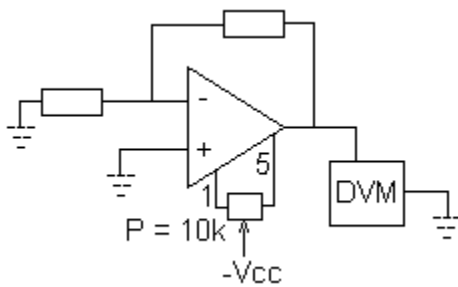
São sinais indesejáveis devido a descargas atmosféricas, motores elétricos, radiações eletromagnéticas que podem aparecer na saída do A.O. Uma boa proteção contra ruídos é obtida através de capacitores de 0,1uF entre o terra e o pino do A.O. onde se aplica a alimentação simétrica.

Sensibilidade a temperatura (DRIFT)

As variações térmicas provocam alterações acentuadas nas características elétricas dos A.O. As variações de corrente são indicadas pelo fabricante como dI/dt (mA/ °C) e as variações de tensão dV/dt (uV / °C)

OFF-SET nos A.O.

É a tensão encontrada na saída dos A.O. quando suas entradas são nulas, isto é, a tensão de erro de saída dos A.O. A minimização da tensão de off-set pode ser obtida através de um divisor de tensão conectado ao estágio diferencial de entrada. Este divisor de tensão permitirá o balanceamento das correntes de base e coletor, de tal forma que a diferença de tensão entre os valores de V_{be1} e V_{be2} seja praticamente nulo. O ajuste da tensão de off-set deve ser feito com as entradas inversora e não-inversora conectadas ao terra.



R_e = resistor de equalização

Off-set varia com a DRIFT

Ajustar P até zerar na saída

Estrutura interna em bloco de um típico AO e Estrutura Interna do CA 741



Típico (741):

$A_v : 100.000$

(Alto ganho até 1Mhz)

$Z_{in} : 2M\Omega$

$Z_{out} : 75 \Omega$

S.R. = 0,5 volts/useg

Drift $A_{vo} = 50000$ a 25 °C e 25000 a 125 °C

$I_a = 1,7 \text{ mA}$ a 25 °C e 1,5 mA a 125 °C

OFF-SET = 3mV a 25 °C

Largura de banda ajustável (1Mhz e $A_v=1$)

Ajustável via res. Ext.

Pot < 1W

$-55^\circ < T^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C}$

Aplicações : Amplificar sinais de sensores (pequenos sinais), compensação de circuitos, sistemas de anúncio, controle e instrumentação industrial e nos equipamentos eletrônicos usuais.

Tecnologia e Famílias

Bipolar (CA741, uA741, SN741) – 3ª Geração 1965

BIFET (LM351, LF318) – 4ª Geração 1975

Vantagem BIFET : Altíssima impedância de entrada, pois usa FET na entrada.

Encapsulamento

Plano (flat-back)

Metálico (metal-can)

Linha dupla (Dual line package)

Linha Simples (Single line package)

Parâmetros => condições normais de operação, sem ultrapassar o limite estipulado pelo fabricante.

Tensão de alimentação (V_f) : É a máxima fonte simétrica ou unipolar permitida (V_{cc}). Na ausência de fonte simétrica e necessidade de uso, pode-se usar uma unipolar e mais um divisor de tensão (gerando por conseguinte um terra virtual).

Dissipação interna de potência (D_p) : É a máxima potência de dissipação à T_{amb} .

Tensão diferencial de entrada (V_{de}) : É a tensão máxima de entrada que pode ser injetada nas entradas + e -.

Tensão de entrada (V_{emc}) : É a tensão máxima de trabalho das entradas + ou - e que na prática não pode ultrapassar o limite de V_{cc} .

Temperatura de operação (T_a) : É a faixa de trabalho de temperatura permitida.

Duração de curto circuito na saída : Tempo máximo para curto sem danificar o C.I.

Corrente de fonte : É a corrente solicitada da fonte de alimentação pelo Amp.Op.

Separação de canais (Crosstalk = interferências) : quando em um C.I. há mais de um Amp.Op. e o sinal entrante em um interfere no outro ou demais.

Definições importantes

Tensão de Offset de entrada : Tensão de compensação que deve ser aplicada aos terminais de entrada para se obter na saída o valor de zero volt.

Corrente de Offset de entrada : É a diferença entre as correntes nos dois terminais de entrada.

Tensão de operação quiescente : É a tensão DC no terminal de saída, medida em relação ao terra.

Resistência de entrada : É a resistência vista por uma das entradas quando a outra está aterrada.

Ganho de tensão em modo comum : É a relação entre a tensão em um dos terminais de saída e a tensão comum aplicada aos dois terminais de entrada, conectados em paralelo para AC.

Slew Rate (razão de resposta) : É a variação máxima de tensão de saída em função do tempo, quando o ganho de tensão é único.

Tensão de saída máxima : É a V_{pp} em relação ao terra sem distorção.

Resistência de saída : V_{out} / I_{out} em relação ao terra.

CMRR (taxa de rejeição em modo comum) : É a medida da capacidade de rejeição de sinais presentes simultaneamente nas duas entradas do operacional. É a relação entre a tensão de entrada em modo comum e a tensão produzida na saída, expressa em dB.

Corrente de polarização de entrada : É a corrente DC e varia diretamente em relação a Temperatura.

Banda passante : É o limite superior da frequência de corte do C.I. Quanto menor, maior o ganho.

Terra Virtual : Condição de tensão de entrada valendo 0 volts (igual a por um curto).

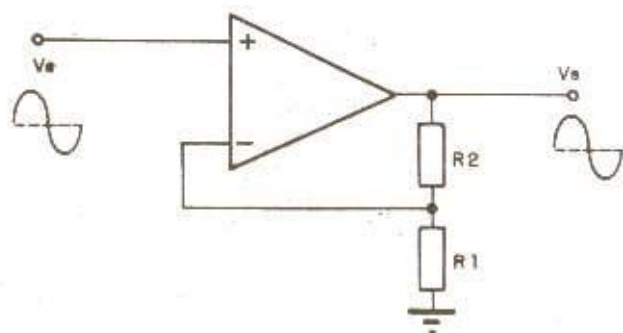
Compensação de saída : Tensão para produzir uma tensão na saída em torno de 0V; fatores que influenciam : $I_{polarização}$ de entrada, corrente de offset de entrada e tensão de offset de entrada. O problema é contornado colocando um resistor de compensação (R_c) na entrada não inversora, ligando o outro lado ao terra.

$R_c = (R_f \times R_i) / (R_f + R_i)$, para um amplificador com realimentação feita na entrada inversora, bem como a entrada do sinal.

Obs : a tensão de saída é limitada pela tensão de alimentação da fonte. Para AO reais : Z_{in} não é infinita e Z_{out} não é nula; resposta de frequência tem ganho reduzido com o aumento da frequência. O ponto Q varia com T_{amb} e tempo.

Configuração dos amplificadores operacionais

Amplificador não inversor



Sinais estão em fase.

Ganho de tensão em malha fechada

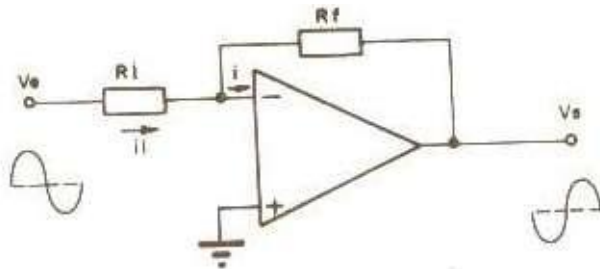
$$A_{mf} = 1 + (R_2/R_1) = V_s / V_e$$

Ganho de tensão em malha aberta

$$A_{ma} = V_e / V_s$$

Obs. : A impedância de saída diminui, quando o ganho aumenta

Amplificador inversor



Sinais defasados 180°.

Ganho de tensão de malha fechada

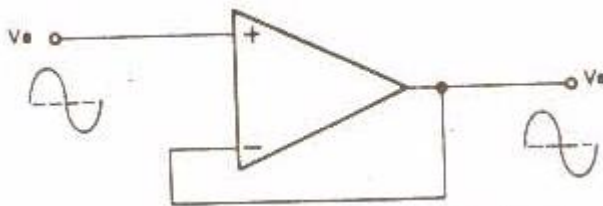
$$A_{mf} = - R_f / R_i = V_s / V_e$$

Para variar amplitude, variar R_f e/ou R_i .

V_s não é afetada por R_L na saída do Amp.Op. Z_{in} é alta, embora menor que caso acima, para assumir $I_{entrada} = 0$.

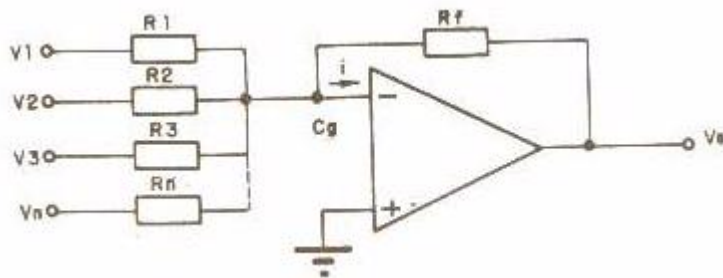
* Passível de utilização de um resistor de compensação na entrada não inversora. *
Influencia na $I_{polarização}$, I_{offset} e V_{offset} na entrada

Seguidor de Tensão



É um amplificador não inversor com ganho unitário e seu uso é idêntico ao transistor como seguidor de emissor, separando o sinal de entrada da carga. Z_{in} é alta e Z_{out} é baixa. $A_v = 1$

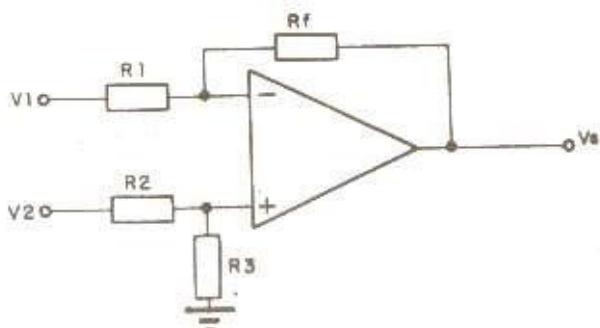
Amplificador Somador



$$V_s = - ((R_f/R_1) \cdot V_1 + (R_f/R_2) \cdot V_2 \dots)$$

Z_{in} é o próprio resistor de entrada para cada tensão.

Amplificador Subtrator (Analógico)

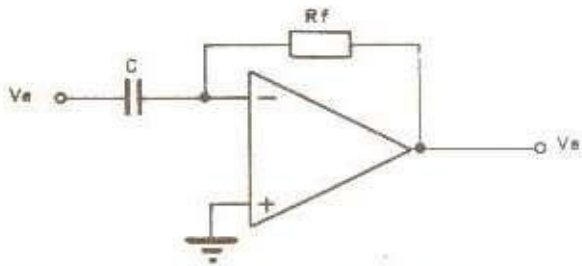


V_s é a diferença entre as tensões de entrada

$$V_s = -(R_f/R_1) \cdot V_1 + ((1+R_f/R_1) \cdot (R_3/(R_2+R_3))) V_2$$

Se $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$, então $V_s = V_2 - V_1$

Amplificador Diferenciador (F.P.B.)



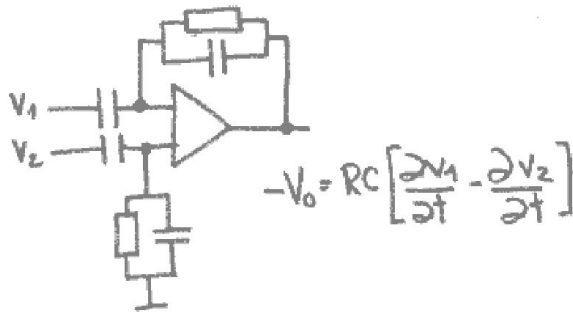
Aplicação : separação da freq. vert. (60hz)
da freq. horiz. (15750hz)

$V_s = - R_f \cdot C \cdot dV_e/dt$, onde :

dV_e – Tensão de entrada (tensão de pico)

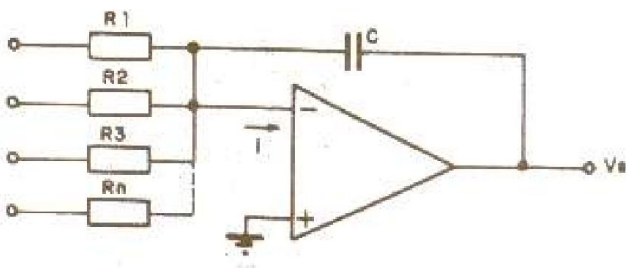
dt – tempo em segundos

A saída é defasada 90° e invertida em relação à entrada, pois o sinal entra por (-).



Aplicando os conceitos acima, pode-se obter circuitos para soma e subtração de derivadas. Apesar de não se acharem inclusos, os capacitores de realimentação e bypass devem ser introduzidos por questões de estabilidade.

Amplificador Integrador



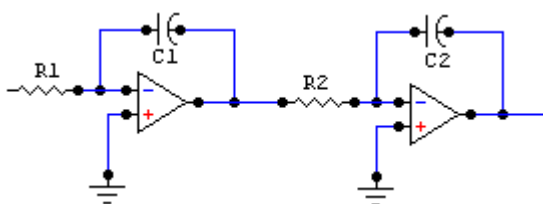
É o inverso do diferenciador.

Ao entrar com onda quadrada, a saída será triangular.

$V_s = - 1/RC \cdot \text{integral de } (V_1 + V_2 + \dots) Dt$

Se houver apenas uma entrada, então será V_e .

Para uma dupla integração teremos :



$V_s = - (1 / RC)^2 \cdot \text{Int Int } (V_1(t)dt dt$

Onde $R_1 = R_2 = R$ e $C_1 = C_2 = C$

Para este caso teremos :

$V_o = - 1 / RC \text{ Int } (V_1 - V_2) dt$

