

AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Introdução

O termo amplificador operacional designou, inicialmente, um tipo de amplificador que, mediante a escolha adequada de componentes do circuito em que era inserido, podia desempenhar uma série de operações tais como amplificação (multiplicação), adição, subtração, diferenciação e integração. A primeira aplicação dos amplificadores operacionais foi, por isso, em computadores analógicos. Os primeiros protótipos de amplificadores operacionais (AmpOp) eram grandes, caros e gastavam muita energia. A primeira miniaturização surgiu com o transistor bipolar de junção e levou ao uso mais generalizado dos AmpOps. No entanto o seu uso corrente só ocorreu com o aparecimento dos circuitos integrados, na década de 60.

Um amplificador é um dispositivo com uma entrada e uma saída. A saída está relacionada com a entrada através da equação:

$$\text{saída} = \text{entrada} \times \text{ganho}$$

em que o ganho é uma constante de proporcionalidade. Por isso ele também é designado por amplificador linear.

O modelo mais comum é o amplificador de tensão no qual a entrada e a saída são sinais de tensão. A Figura 1 ilustra um esquemático simplificado de um amplificador de tensão. A entrada desempenha normalmente um papel passivo de modo que o seu equivalente é apenas uma resistência que designamos por R_i e que designamos por resistência de entrada do amplificador. A saída será uma fonte de tensão V_o , controlada pela tensão de entrada V_i , em série com uma resistência R_o , designada por resistência de saída. A_{oc} na figura é o ganho em tensão e exprime-se em volts/volt. A fonte de alimentação do amplificador é uma fonte de tensão V_s em série com uma resistência R_s ; a resistência na saída R_L desempenha o papel de carga elétrica conectada no amplificador operacional.

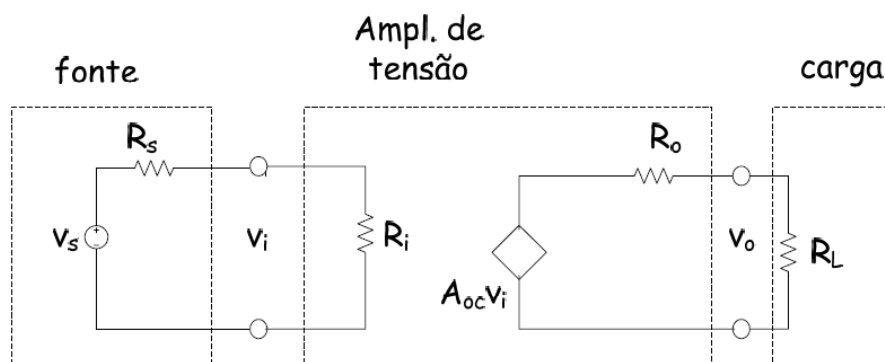


Figura 1: Modelo do amplificador de tensão

O amplificador operacional é um amplificador de tensão com ganho muito elevado. Um exemplo típico é o amplificador do circuito integrado 741 que tem um ganho de 200000V/V. Há ganhos superiores a este.

Amplificador Operacional Ideal

Um amplificador bem projetado não deve receber corrente na entrada e deve apresentar uma resistência próxima de zero na saída. Além disso, não deve ser afetado significativamente por características externas, como temperatura e frequência do sinal de alimentação, e deve possuir um alto ganho de tensão em malha aberta (quando a saída não realimenta a entrada). Portanto, um AmpOp ideal possui as seguintes características:

- Resistência de entrada R_i infinita;
- Resistência de saída R_o nula;
- Ganho de tensão em malha aberta infinito;
- Resposta de frequência infinita;
- Insensibilidade à temperatura.

Os modelos reais dos AmpOps afastam-se ligeiramente do modelo ideal, como seria de esperar.

Um modelo típico de um AmpOp é mostrado na Figura 2. As entradas designadas por V_1 e V_2 são respectivamente a entrada inversora e não inversora. $+V$ e $-V$ são as alimentações, que são normalmente $+e-15V$. V_o é a tensão de saída, que é a diferença entre as tensões de entrada V_1 e V_2 , multiplicadas pelo ganho a , e limitadas pelas tensões de alimentação:

$$V_o = a(V_2 - V_1)$$

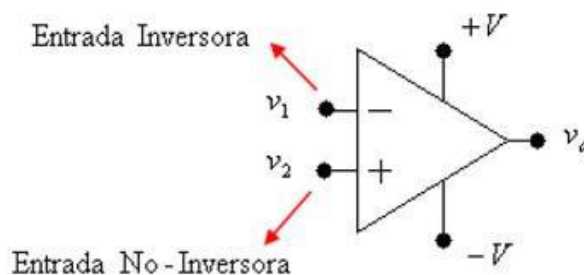


Figura 2: O AmpOp ideal

O AmpOp ideal pode ser analisado como um componente com três zonas de operação distintas: zona de saturação negativa, zona linear, zona de saturação positiva.

A zona linear é a mais usada. Na zona linear a tensão no terminal de saída do AmpOp é proporcional à diferença de potencial entre os seus terminais de entrada, com uma constante de proporcionalidade (ganho) – aqui definida como a - de valor elevado. Sendo assim, para funcionar nesta zona a diferença

de tensão entre os terminais de entrada deve ser muito pequena, para evitar a saturação. Daqui resulta a simplificação na análise do seu comportamento de considerar que V_2 é aproximadamente igual a V_1 . A equação abaixo é válida desde que $-V < V_0 < +V$.

$$V_0 = a (V_2 - V_1) \Rightarrow V_2 \approx V_1 \text{ (considerando que o ganho } a \text{ é muito elevado)}$$

As zonas de saturação negativa e positiva correspondem às situações em que a tensão no terminal de saída é limitada pelas tensões de alimentação inferior e superior do AmpOp. Quer isso se deva ao fato de o amplificador não estar realimentado ou estar realimentado positivamente, quer seja consequência de a tensão de saída tentar superar os extremos de alimentação do circuito (aqui definidos com $+V$ e $-V$), saindo, portanto, da zona de operação linear. Nestas duas zonas será válida uma das seguintes expressões:

$$V_0 = +V \Rightarrow V_2 > V_1$$

$$V_0 = -V \Rightarrow V_2 < V_1$$

O gráfico abaixo mostra as três regiões de operação de um AmpOp.

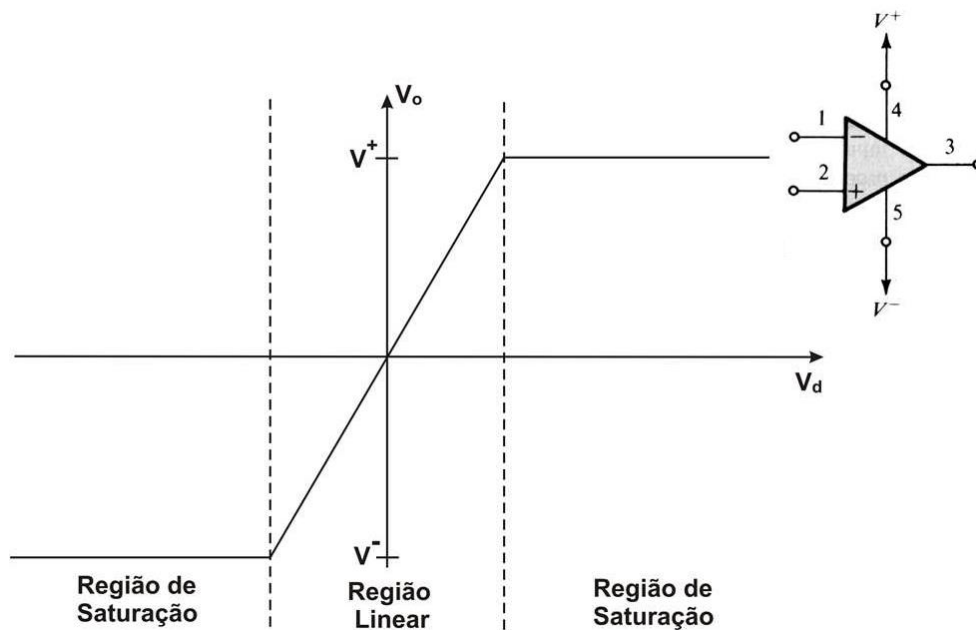
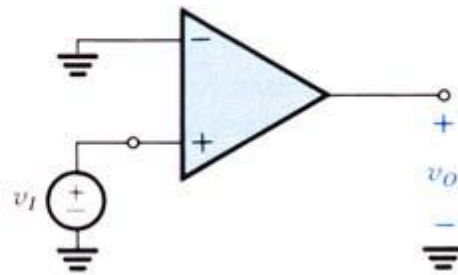


Figura 3: Regiões de operação de um AmpOp.

Montagens Típicas

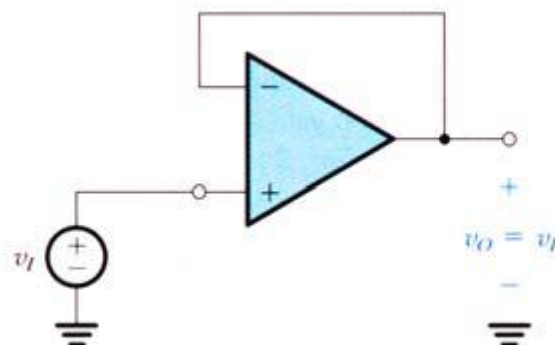
- a) Circuito comparador



A aplicação mais simples do ampop é na realização de um circuito comparador como o apresentado na figura anterior. Consiste em ligar um dos terminais a um nível de referência e o outro terminal ao sinal a analisar. Neste exemplo, o terminal V_1 do ampop é ligado ao terra e o terminal V_2 é ligado a uma fonte de tensão. Como acontece nos demais circuitos sem realimentação, o ampop opera na zona não linear (saturação). Neste caso, para valores de v_i inferiores a 0 V, a diferença de potencial ($V_2 - V_1$) é negativa e o dispositivo satura negativamente. Reciprocamente, para valores de v_i superiores a 0 V, a diferença de potencial ($V_2 - V_1$) à entrada é positiva e o dispositivo satura positivamente.

Tipicamente este circuito é usado para comparar dois sinais (ou níveis de tensão) e gerar uma informação correspondente à ordem relativa dos valores de tensão dos sinais (por exemplo, tensão positiva se A maior que B e negativa se B maior que A).

b) Circuito seguidor

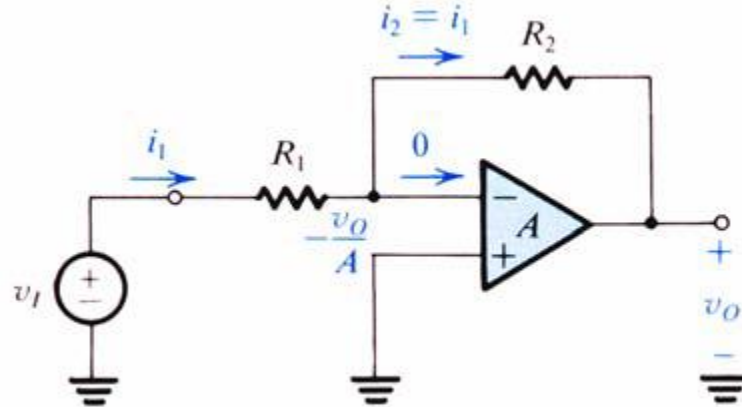


O circuito seguidor representado na figura anterior é um circuito simples e prático. É composto apenas por um ampop em que a saída está ligada ao terminal inversor (V_1). A tensão de saída, que é igual a V_1 , acompanha a tensão no terminal V_2 desde que não sejam atingidas as tensões de alimentação do ampop (caso em que o dispositivo entra na zona de saturação). Assim temos que $V_0 = V_1 = V_2 = v_i$

Esta montagem tem como principal função tirar partido da alta impedância de entrada (e/ou baixa impedância de saída) do ampop de modo a isolar

eletricamente dois blocos de circuito independentes ligados. É vulgarmente usada como bloco de saída de variados circuitos elétricos ou como circuito de interface entre dois circuitos.

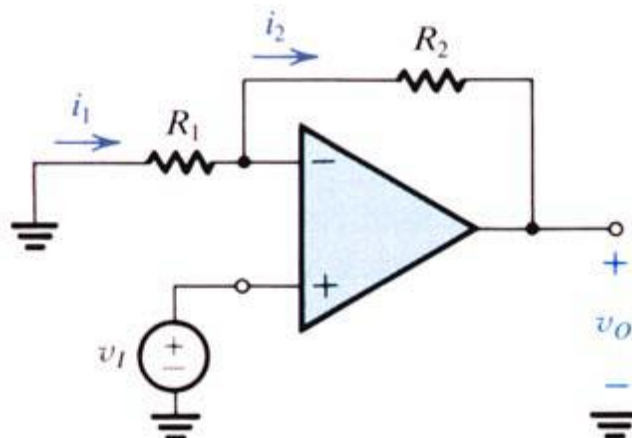
c) Circuito inversor com ganho



Esta montagem é usada para amplificar um sinal. O sinal de entrada é multiplicado por um ganho (negativo), pelo que a polaridade é invertida. O circuito é composto por um ampop em que a saída está ligada ao terminal inversor V_1 através da resistência de realimentação R_2 . A tensão de saída é igual à tensão de entrada multiplicada pela razão $-R_2/R_1$. Desde que a tensão de saída não atinja as tensões de alimentação, o ampop está na zona linear, e é válida a seguinte equação:

$$V_0 = -v_i \frac{R_2}{R_1}$$

d) Circuito não inversor com ganho

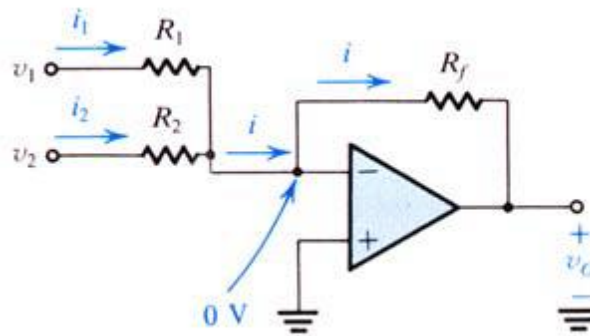


Esta montagem é semelhante à montagem anterior, no entanto, o sinal de entrada é neste caso multiplicado por um ganho positivo, pelo que a polaridade

não é invertida. O terminal inversor V_1 acompanha a tensão de entrada v_i , pelo que se deduz que a tensão de saída é igual à tensão de entrada multiplicada pela razão $(R_2+R_1)/R_1$. Assim, desde que a tensão de saída não atinja as tensões de alimentação, é válida a seguinte equação:

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_i$$

e) Circuito somador

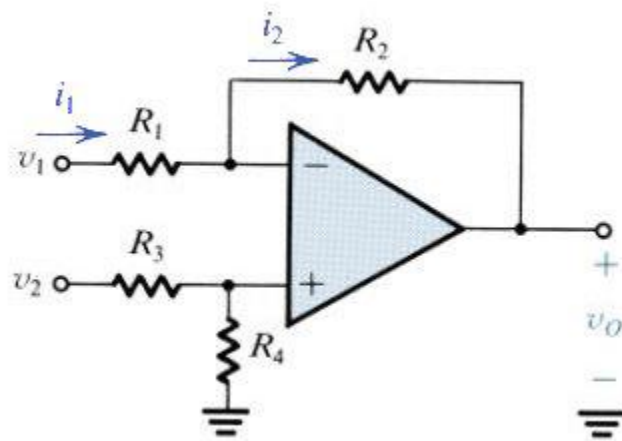


Esta montagem é usada para somar dois ou mais sinais. Neste caso consideram-se v_1 e v_2 como dois sinais genéricos à entrada do circuito. Tendo em conta a lei dos nós, verifica-se que as correntes i_1 e i_2 , proporcionais às entradas v_1 e v_2 respectivamente, são somadas no nó do terminal inversor V_1 , dando origem à corrente i , que impõe a tensão de saída ao atravessar a resistência de realimentação R_f . Assim, desde que a tensão de saída não atinja as tensões de alimentação, é válida a seguinte equação:

$$V_0 = -\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2}\right) R_f$$

Como se verifica, a saída é uma soma ponderada das tensões de entrada (embora com polaridade invertida). Tipicamente são utilizados valores de R_1 , R_2 e R_f iguais de modo que V_0 seja igual à soma de v_1 com v_2 .

f) Circuito de subtração

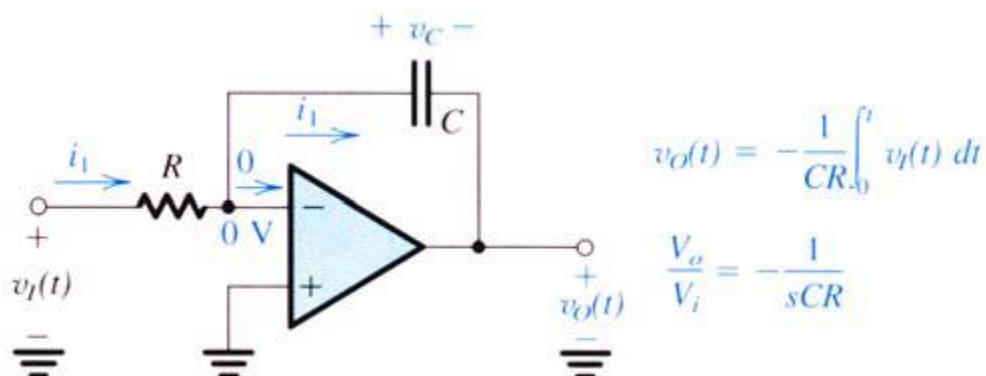


Este circuito é semelhante ao somador e é usado para subtrair dois sinais v_1 e v_2 . O terminal não inversor V_2 tem uma tensão imposta pelo divisor resistivo R_3 e R_4 . A tensão no terminal inversor V_1 é igual à tensão em V_2 , desde que o ampop não entre na zona de saturação. Assim é válida a seguinte equação:

$$V_0 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2 + R_1}{R_1} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1$$

A saída é uma subtração ponderada das tensões de entrada. Se os valores das resistências utilizadas forem todos iguais (i.e. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$), a saída V_0 é igual a $v_2 - v_1$, implementando assim a subtração entre os dois sinais de entrada.

g) Circuito integrador

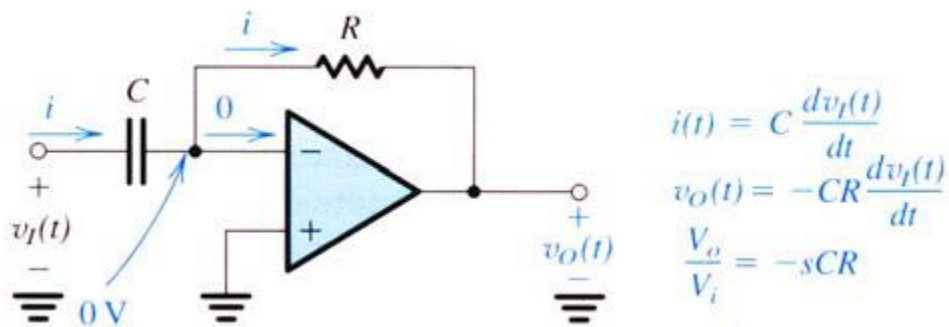


O circuito integrador é um bloco fundamental na implementação de filtros. Esta montagem pode ser analisada de um modo muito simples se for comparada com a montagem inversora. Assim, substituindo R_2 pela capacitância C podemos chegar à fórmula final dada por:

$$V_0 = -\frac{1}{RC} \int v_i dt$$

Deste modo, a tensão de saída é proporcional ao integral da tensão de entrada. O ganho do integrador é $-1/RC$, pelo que a saída será simétrica ao sinal de entrada integrado no tempo.

h) Circuito diferenciador



O circuito diferenciador também é usado na implementação de filtros RC. O circuito pode igualmente ser analisado como uma montagem inversora em que R1 é substituído pela capacitância C, obtendo a equação:

$$V_0 = -RC \frac{dv_i}{dt}$$

Deste modo, a tensão de saída é proporcional à derivada da tensão de entrada. O ganho é $-RC$, pelo que também neste caso a saída será simétrica à derivada do sinal de entrada.