

Amplificador Operacional

Os modelos a seguir, se referem a modelos elétricos simplificados para os amplificadores de tensão e de corrente sem realimentação. Os modelos consideram três elementos apenas: duas impedâncias, uma de entrada e outra de saída, e uma fonte de tensão dependente.

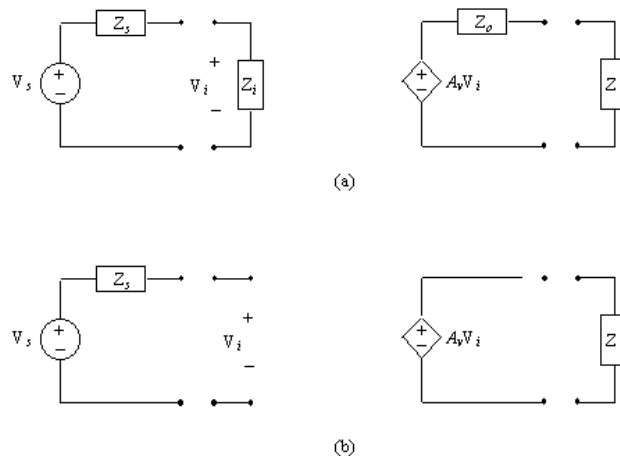


Figura 1 Amplificador de tensão: não ideal (a) e ideal (b)

A ligação de um amplificador a uma fonte de sinal e a uma carga envolve dois divisores de tensão que reduzem o ganho máximo obtível (Figura 1.a). Referindo ao esquema elétrico da Figura 1.b, verifica-se que a construção de uma cadeia de amplificação otimizada passa pelo recurso de amplificadores de tensão que gozem, pelo menos, das seguintes duas propriedades: impedância de entrada infinita, e impedância de saída nula. Se a estas duas propriedades se juntarem um ganho de tensão infinito, a não dependência do mesmo com a frequência e a possibilidade de aplicar na entrada e obter na saída quaisquer valores de tensão, então obtém-se aquilo que vulgarmente se designa por **amplificador operacional ideal**, ou AmpOp.

Apesar deste conjunto idealizado de propriedades, é um fato que o AmpOp ideal constitui uma boa aproximação do desempenho elétrico de uma vasta gama de circuitos integrados utilizados na prática. Com efeito, existem no mercado AmpOps cujo ganho ascende a 10^6 , e cujas resistências de entrada e de saída são, respectivamente, várias dezenas a centenas de $M\Omega$ e algumas unidades ou décimas de ohm.

Os elevados ganho e resistência de entrada do AmpOp estão na origem do curto-circuito virtual, que em alguns casos particulares implementa uma massa virtual. Este operador possibilita a realização de amplificadores de tensão cujo ganho depende apenas do cociente entre duas resistências, amplificadores soma e diferença de sinais, circuitos integradores e diferenciadores de sinal, filtros, conversores corrente-tensão e tensão-corrente, conversores de impedâncias, circuitos retificadores de sinal, comparadores de tensão, etc.. Não é exagero afirmar que, na atualidade, o AmpOp constituiu o paradigma dominante no projeto de circuitos eletrônicos analógicos.

Os amplificadores operacionais são constituídos por múltiplos componentes eletrônicos, nomeadamente transistores, resistências e capacitores. No entanto, neste texto limitamos o estudo do AmpOp à identificação e utilização prática das propriedades dos seus terminais de acesso.

1 - AmpOp Ideal

O AmpOp ideal constitui um modelo simplificado de um amplo conjunto de amplificadores de tensão atualmente existentes no mercado. Caracteriza-se pelas seguintes quatro propriedades (Figura 2):

- (i) impedância de entrada infinita;
- (ii) impedância de saída nula;
- (iii) ganho de tensão infinito;
- (iv) ausência de qualquer limitação em frequência e em amplitude.

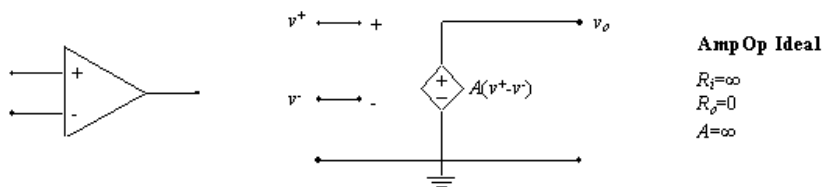


Figura 2 AmpOp ideal

A principal consequência do conjunto de propriedades apenas enunciado é, na prática, a possibilidade de estabelecer um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada do AmpOp. Com efeito, a existência de uma tensão finita na saída só é compatível com um ganho infinito desde que a diferença de potencial entre os dois terminais de entrada seja nula. A natureza virtual deste curto-circuito deve-se à coexistência de uma igualdade entre tensões sem ligação física entre terminais. Na Figura 3 ilustra-se o significado prático de um curto-circuito virtual.

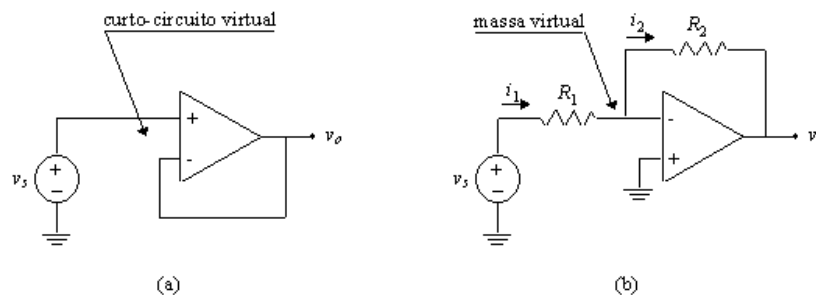


Figura 3 Curto-circuito e massa virtual

Por exemplo, no caso da montagem em (a) a relação entre as tensões nos nós é

$$v_o = v^- = v^+ = v_s \quad (1)$$

isto é, a tensão na saída do AmpOp segue a da fonte de sinal aplicada na entrada. Por outro lado, no caso da montagem representada em (b) verifica-se que

$$v^- = v^+ = 0 \quad (2)$$

ou seja, que o terminal negativo do amplificador se encontra ao nível da massa, sem no entanto se encontrar fisicamente ligado a ela. Diz-se então que o terminal negativo do amplificador operacional constitui uma massa virtual.

2 - Montagens Básicas

O AmpOp é vulgarmente utilizado em duas configurações básicas: a montagem inversora e a montagem não-inversora. Os circuitos estudados neste capítulo constituem todos eles ou variações ou combinações destas duas configurações básicas.

No que diz respeito às metodologias de análise de circuitos com AmpOps, existem basicamente as seguintes duas alternativas:

(i) uma que assume a presença de um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada do AmpOp (em conjunto com correntes nulas de entrada);

(ii) e uma outra que considera o AmpOp como uma fonte de tensão controlada por tensão e utiliza as metodologias convencionais de análise de circuitos.

Adiante se verá que a primeira metodologia é de mais simples aplicação aos circuitos com AmpOps ideais, ao contrário da segunda, que se destina essencialmente à análise de circuitos com AmpOps reais, neste caso com limitações em ganho, frequência, e impedâncias de entrada e de saída.

2.1 Montagem Inversora

Considere-se na Figura 4.a o esquema elétrico da montagem inversora do AmpOp.

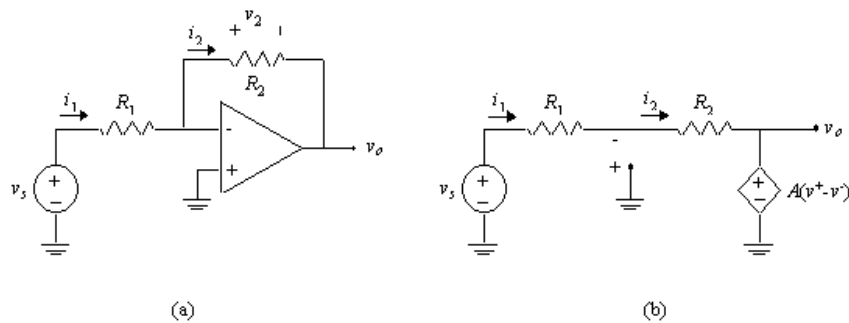


Figura 4 Montagem inversora

Tendo em conta o fato da existência de um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada, o que implica a igualdade $v^+ = v^- = 0$, e ainda o fato de as correntes nos nós de entrada serem nulas, $i^- = i^+ = 0$, verifica-se então que

$$i_1 = i_2 = \frac{v_s - 0}{R_1} = \frac{v_s}{R_1} \quad (3)$$

e que, portanto,

$$v_o = -v_2 = -R_2 \frac{v_s}{R_1} \quad (4)$$

Como tal, o ganho de tensão da montagem é dado por

$$\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

o qual é apenas função do cociente entre os valores das resistências R_2 e R_1 .

O método alternativo de análise consiste em substituir o AmpOp por uma fonte de tensão dependente com ganho finito (Figura 4.b). Neste caso trata-se de aplicar um dos métodos de análise introduzidos ao longo desta apostilha, por exemplo resolver o sistema de equações

$$\begin{cases} i_1 = i_2 \\ v_o = A(v^+ - v^-) = -Av^- \end{cases} \quad (6)$$

que equivale a

$$\begin{cases} \frac{v_s - v^-}{R_1} = -\frac{v_o - v^-}{R_2} \\ v_o = -Av^- \end{cases} \quad (7)$$

de cuja resolução resulta o ganho

$$\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{AR_1}{AR_1 + R_1 + R_2} \quad (8)$$

cujo limite quando o ganho do AmpOp tende para infinito é

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \left[-\frac{R_2}{R_1} \frac{AR_1}{AR_1 + R_1 + R_2} \right] = -\frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

2.2 Montagem Não-Inversora

Considere-se na Figura 5.a a montagem não inversora do AmpOp.

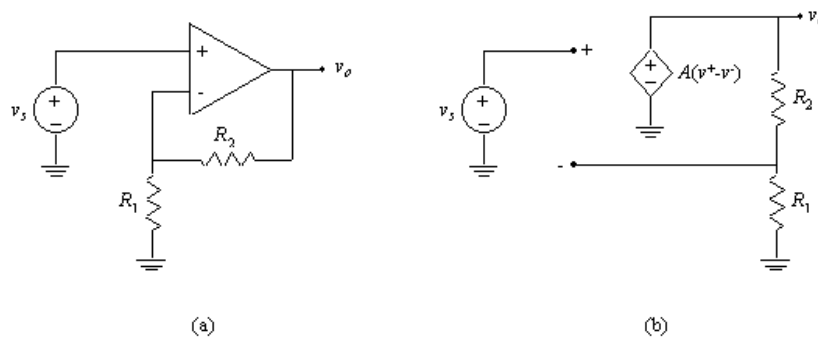


Figura 5 Montagem não-inversora

A existência de um curto-circuito virtual entre os nós de entrada do amplificador permite escrever a igualdade entre as três tensões

$$v^- = v^+ = v_s \quad (10)$$

que em conjunto com a equação do divisor resistivo na saída

$$v^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o \quad (11)$$

conduz à relação de ganho

$$\frac{v_e}{v_s} = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}_{\text{ganho}} \quad (12)$$

ganho desta montagem é positivo, superior à unidade e, mais uma vez, dependente apenas do cociente entre os valores das resistências R_1 e R_2 .

Pode facilmente demonstrar-se que a aplicação do método alternativo de análise conduz à expressão (Figura 5.b)

$$\frac{v_e}{v_s} = \frac{A}{1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (13)$$

cujo limite quando o ganho do AmpOp tende para infinito coincide com a relação (12) apenas derivada.