

## Sumário

Introdução	5
Amplificador operacional	6
Representação de circuito de um amplificador operacional	6
Terminais de alimentação do <i>AO</i>	7
Terminais de entrada do <i>AO</i>	8
Características de um <i>AO</i>	9
Impedância de entrada	10
Impedância de saída	11
Ganho de tensão diferencial	12
Tensão <i>offset</i> de saída	14
Rejeição de modo comum	15
Banda passante	19
Amplificador operacional 741	21
Ajuste de <i>offset</i> do <i>AO</i> 741	22
Apêndice	24
Questionário	24
Bibliografia	24



**Espaço SENAI**

### **Missão do Sistema *SENAI***

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

# Introdução

O amplificador operacional é um exemplo característico de circuito eletrônico, disponível na forma de um circuito integrado, cuja utilização se estende a vários ramos da eletrônica.

Este fascículo contém uma análise detalhada das propriedades de amplificadores operacionais, com o objetivo de fornecer informações indispensáveis para que o leitor esteja apto a reparar equipamentos que utilizem aquela classe de dispositivos.



***Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:***

- Amplificador na configuração emissor comum.
- Amplificador na configuração base comum.
- Amplificador na configuração coletor comum.

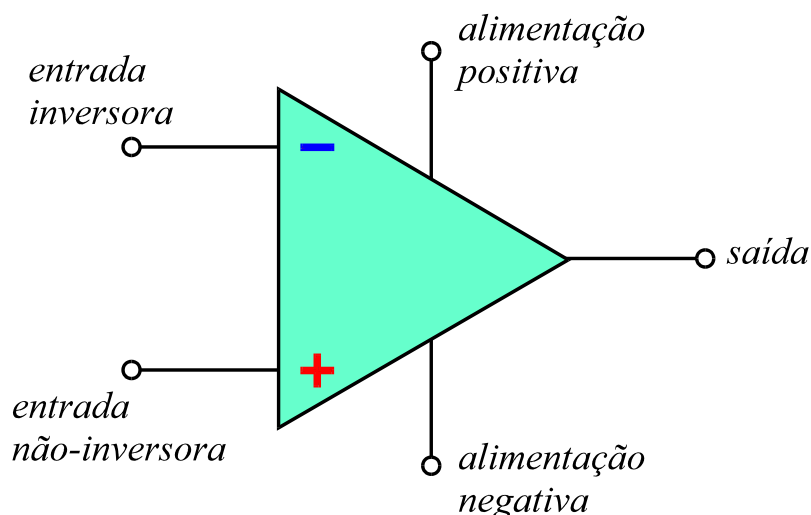
# Amplificador operacional

O amplificador operacional (AO) é um circuito eletrônico, disponível na forma de circuito integrado, com características que se aproximam daquelas de um amplificador ideal. Sua versatilidade o torna aplicável em uma variedade de equipamentos eletrônicos, tais como aqueles utilizados em circuitos industriais, circuitos de áudio, e na filtragem de sinais, entre outros.

O termo **amplificador operacional** tem origem nas primeiras aplicações dessa classe de dispositivos que eram dirigidas para a realização de operações matemáticas de adição, subtração e multiplicação, executadas eletronicamente nos antigos computadores analógicos.

## REPRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O símbolo utilizado para representar o amplificador operacional em diagramas de circuito, corresponde a um triângulo que aponta no sentido de amplificação do sinal, conforme ilustrado na **Fig.1**. Ao triângulo são acrescentados terminais que representam pontos de conexão com o circuito externo.



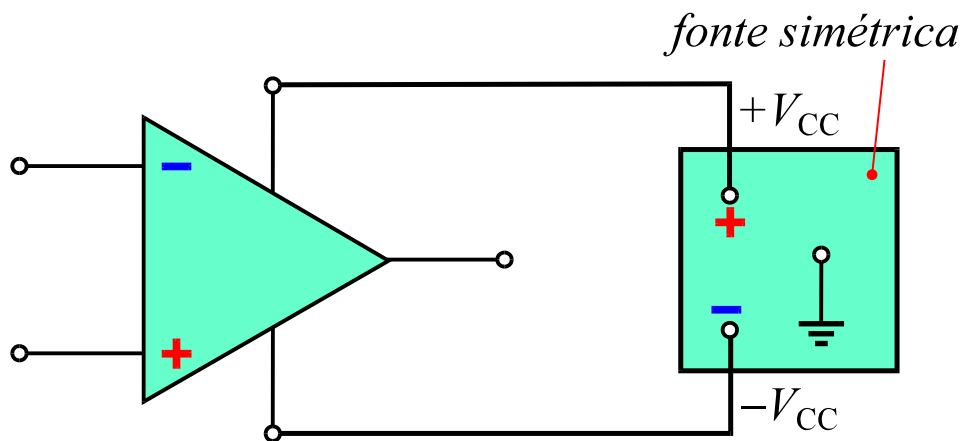
**Fig.1** Representação de circuito de um amplificador operacional.

Como mostrado na **Fig.1**, existem fundamentalmente 5 terminais que fazem parte de todos os tipos de amplificadores operacionais:

- Dois terminais para alimentação.
- Um terminal de saída.
- Um terminal de entrada não inversora.
- Um terminal de entrada inversora.

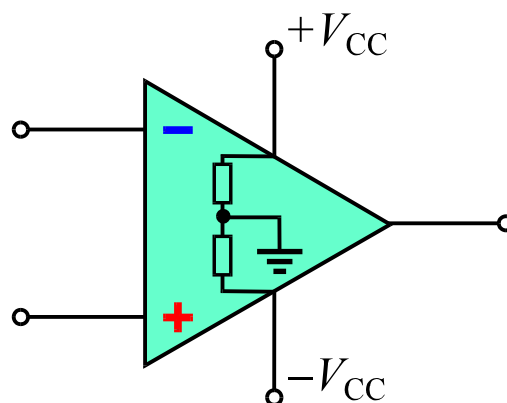
### TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO DO AO

Devido às suas características de construção, os amplificadores operacionais devem ser alimentados com tensões simétricas. A **Fig.2** ilustra o emprego de uma fonte simétrica para alimentação de um AO.



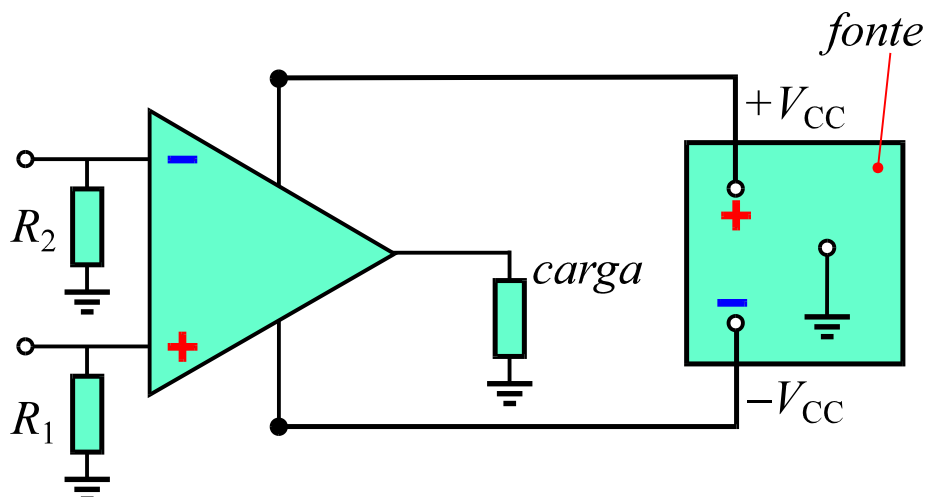
**Fig.2** Forma de alimentação de um AO.

É importante observar que os AOs não são ligados diretamente ao terminal **terra(0V)** da fonte simétrica, pois o circuito composto o amplificador operacional dispõe internamente desse terminal, como ilustrado na **Fig.3**.



**Fig.3** Diagrama da estrutura interna de um AO.

Outros componentes ou circuitos que estejam ligados ao AO e que necessitem do terminal **terra** podem utilizar aquele terminal diretamente da fonte simétrica, como mostrado no exemplo da **Fig.4**.



**Fig.4** Amplificador operacional conectado a um circuito com fonte simétrica.

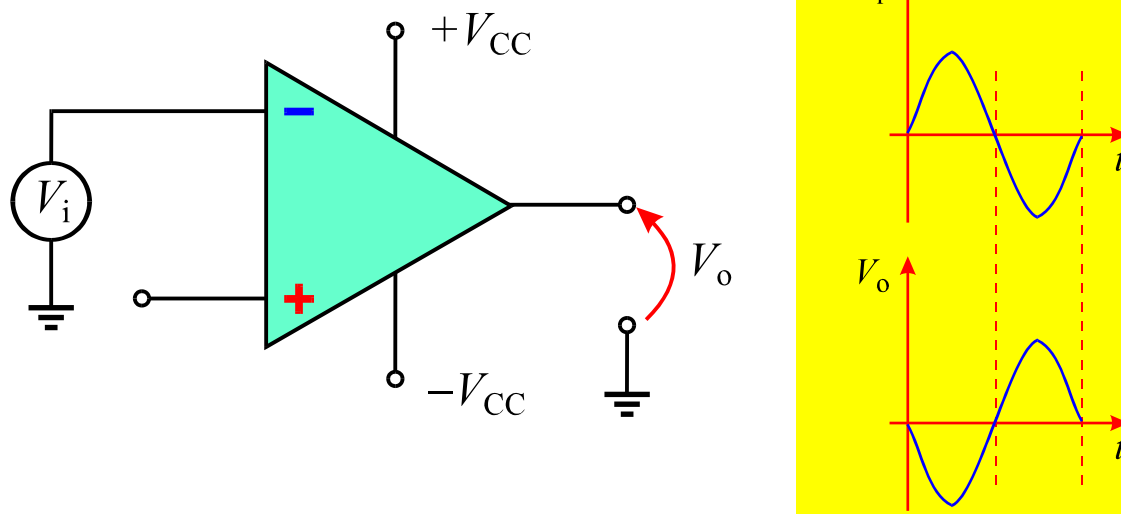
## TERMINAIS DE ENTRADA DO AO

A finalidade básica de um amplificador operacional é realizar a amplificação tanto de tensões contínuas como alternadas. O componente possui dois terminais de entrada, como já indicado na **Fig.1**:

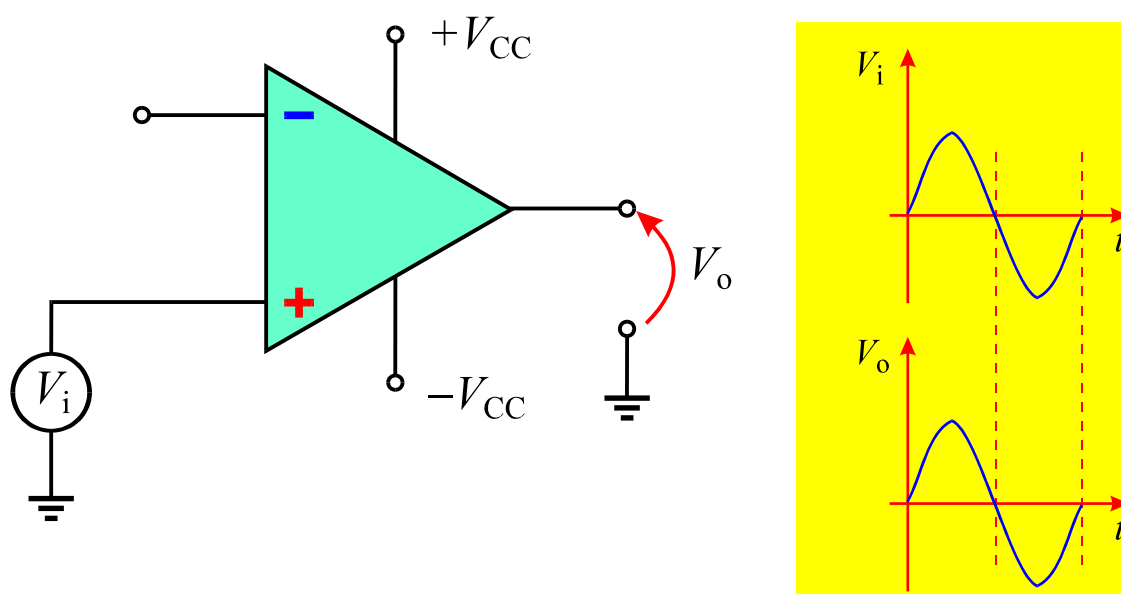
- Um terminal de entrada inversora, indicado pelo sinal (–) no símbolo do AO.
- Um terminal de entrada não inversora indicado pelo sinal (+) no símbolo do AO.

Para os sinais ou tensões aplicadas na entrada inversora (–) o AO se comporta como um amplificador que introduz uma defasagem de  $180^\circ$  no sinal de saída em relação ao sinal de entrada. Esse efeito está ilustrado na **Fig.5** para um sinal aplicado ao terminal inversor.

Para os sinais ou tensões aplicadas na entrada não inversora (+), o AO não introduz nenhuma defasagem entre a entrada e a saída, conforme ilustrado na **Fig.6**.



**Fig.5** Relação entre os sinais de entrada e saída de um AO para um sinal aplicado à entrada inversora do dispositivo.



**Fig.6** Relação entre os sinais de entrada e saída de um AO para um sinal aplicado à entrada não inversora do dispositivo.

## CARACTERÍSTICAS DE UM AO

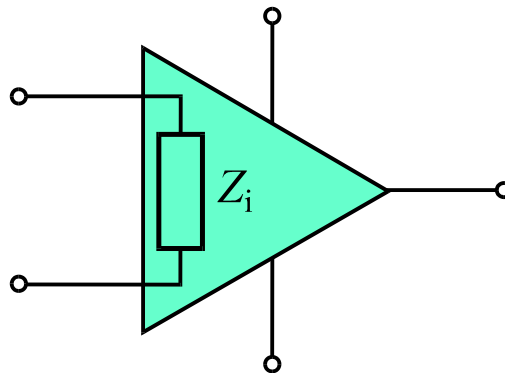
As características ou parâmetros de um AO são fornecidos no folheto de especificações do fabricante e possibilitam ao usuário determinar, entre os diversos tipos de dispositivos, aquele que se adapta a uma determinada necessidade. Entre os parâmetros especificados, aqueles que merecem atenção especial são os seguintes:

- Impedância de entrada.
- Impedância de saída.
- Ganho de tensão em malha aberta.
- Tensão *offset* de saída.
- Rejeição de modo comum.
- Banda passante.

As características de um amplificador operacional real podem ser analisadas com base nos parâmetros característicos de um *AO* ideal. Nesse sentido, os fabricantes procuram continuamente desenvolver novos circuitos cujas características se aproximam das ideais. São definidos nas seções seguintes os parâmetros característicos listados anteriormente.

## IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

A impedância de entrada  $Z_i$  de um *AO* é aquela que seria medida entre os terminais de entrada do dispositivo, conforme mostrado na **Fig.7**.



**Fig.7** Representação do parâmetro  $Z_i$  de um *AO*.

Idealmente o *AO* deveria ter terminais de entrada totalmente isolados, e conseqüentemente, o *AO* ideal deve exibir uma impedância de entrada infinita. A aplicação de uma tensão de entrada resultaria em uma corrente injetada nula, pois a condição  $Z_i \rightarrow \infty$  fornece

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} \rightarrow \frac{V_i}{\infty} \rightarrow 0$$

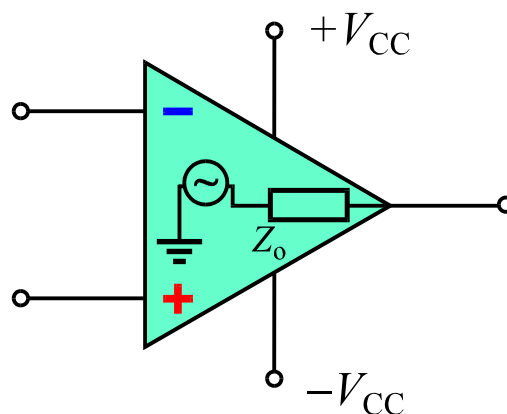
Um *AO* real, construído na forma de um circuito integrado tem uma impedância de entrada da ordem de vários megahoms. Esse alto valor permite, em muitos casos, utilizar o valor ideal  $Z_i \rightarrow \infty$  para o amplificador operacional



real, e nessa aproximação pode-se considerar que a corrente injetada em um AO real é praticamente nula.

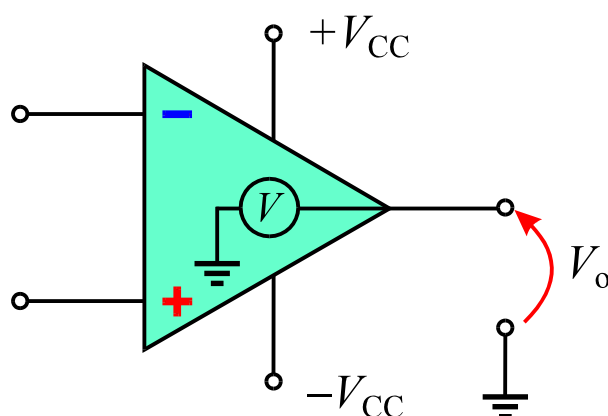
## IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

A impedância de saída  $Z_o$  de um AO é aquela que seria medida entre o terminal de saída e o terra do circuito. Conforme ilustrado na **Fig.8**, o modelo de circuito para a saída de um AO corresponde a uma fonte de tensão ideal em série com um resistor de resistência  $Z_o$ .



**Fig.8** Representação do parâmetro  $Z_o$  de um AO.

Idealmente um amplificador operacional deve exibir  $Z_o = 0 \Omega$  de forma a ter uma saída que se comporte como uma fonte de tensão ideal para a carga, ou seja, uma fonte com resistência interna nula, como indicado na **Fig.9**.

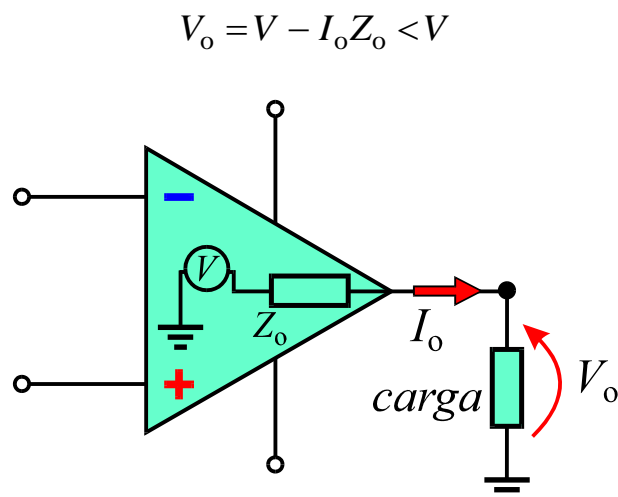


**Fig.9** Modelo de circuito para a saída de um AO ideal.

Com impedância de saída nula, a tensão de saída de um AO ideal depende apenas do valor do sinal de entrada e do ganho do dispositivo, sendo independente da corrente solicitada pela carga.

Em um amplificador operacional real a impedância de saída pode estar situada na faixa  $10\ \Omega < Z_o < 1\ \text{k}\Omega$ . Através de um circuito externo a impedância de saída de um AO pode, em alguns casos, ser reduzida a valores  $Z_o < 1\ \Omega$ .

Um valor não nulo para a impedância de saída de um AO real é um fator indesejável pois a tensão de saída tende a diminuir com o aumento da corrente solicitada pela carga. Isso pode ser concluído com base na **Fig.10**, que indica a existência de uma tensão de carga



**Fig.10** Parâmetros elétricos de um AO real com saída conectada à carga.

Em resumo, a tensão de saída  $V_o$  de um AO real depende dos seguintes fatores:

- Tensão de entrada.
- Ganho do AO.
- Corrente solicitada pela carga.

## GANHO DE TENSÃO DIFERENCIAL

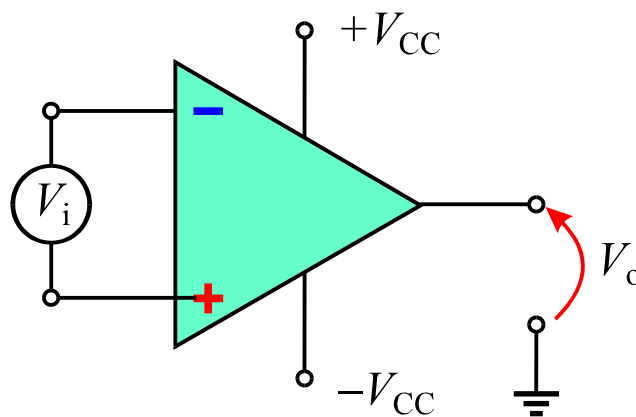
O sinal a ser amplificado por um AO pode ser aplicado de três maneiras:

- Entre a entrada inversora (–) e o terminal terra.
- Entre a entrada não inversora (+) e o terminal terra.
- Entre as entradas (+) e (–).

Quando o sinal é aplicado entre os dois terminais de entrada, na forma mostrada na **Fig.11**, o AO atua como **amplificador diferencial**. Existem dois tipos de ganho associados ao amplificador diferencial:

- Ganho em malha aberta.

- Ganho em malha fechada.

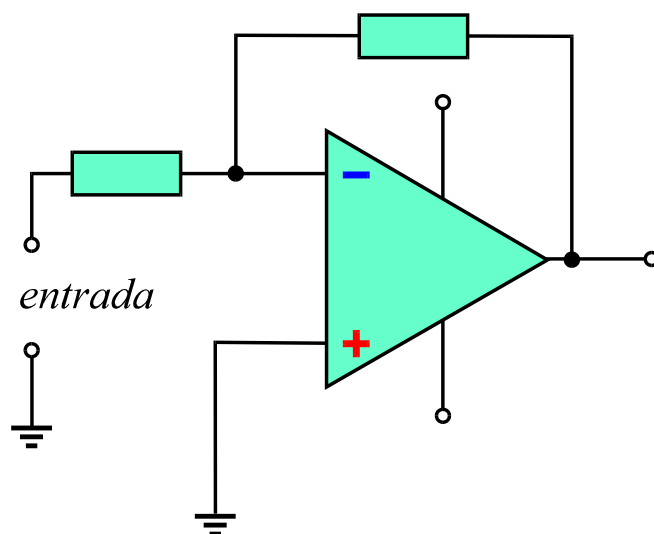


**Fig.11** AO configurado como amplificador diferencial.

**Ganho em malha aberta:** Esse parâmetro é definido como sendo o ganho do amplificador diferencial quando não há ligação entre o terminal de saída e um dos terminais de entrada, conforme mostrado na **Fig.11**. O ganho em malha aberta depende apenas das características intrínsecas do AO.

### Ganho em malha fechada:

Esse parâmetro é definido como sendo o ganho do amplificador diferencial quando é feita uma realimentação externa, conectando o terminal de saída a um dos terminais de entrada, conforme mostrado na **Fig.12**. O ganho em malha fechada depende, além das propriedades intrínsecas do AO, dos parâmetros elétricos dos elementos de circuito utilizados na realimentação.



**Fig.12** AO configurado com elementos de realimentação.



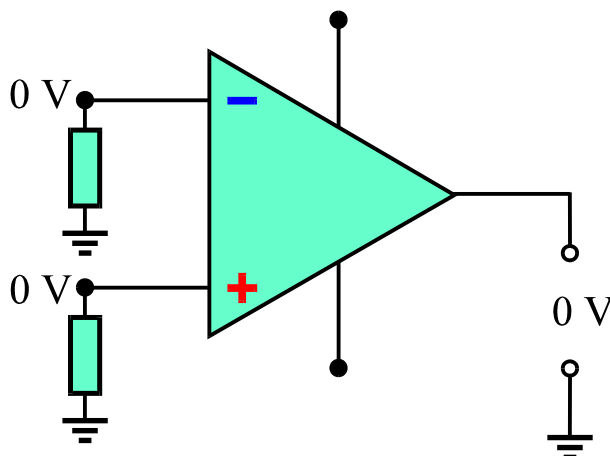
*Os folhetos de especificações do fabricante fornecem o ganho diferencial em malha aberta ( $A_d$ ).*

Idealmente o ganho diferencial em malha aberta de um amplificador operacional deveria ser infinito, ou seja,  $A_d \rightarrow \infty$ . No entanto, o componente real apresenta um ganho que pode variar de  $10^3$  a  $10^6$ .

O ganho de um AO pode ser reduzido a um valor específico com o emprego de um circuito de realimentação, do tipo mostrado na **Fig.12**. Essa é uma das características mais importantes do amplificador operacional, pois o ganho em malha fechada torna-se dependente apenas dos parâmetros elétricos associados aos componentes do circuito de realimentação.

## TENSÃO *OFFSET* DE SAÍDA

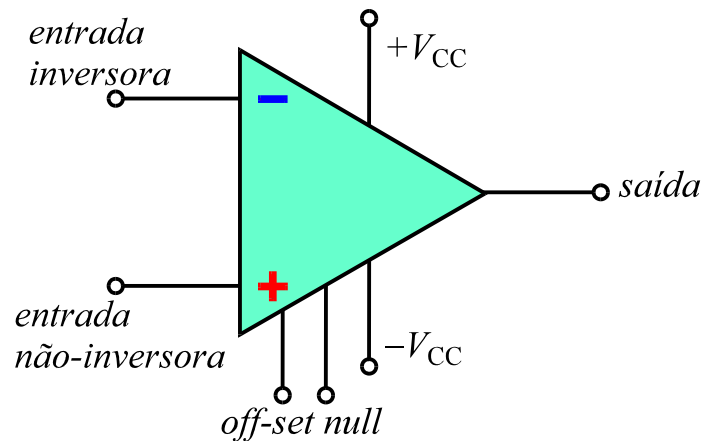
Um amplificador operacional ideal deveria exibir tensão de saída nula, se ambos os terminais de entrada estivessem aterrados, conforme ilustrado na **Fig.13**. No entanto, o componente real exibe tensão de saída não nula mesmo com os terminais de entrada aterrados.



**Fig.13** AO ideal com os dois terminais de entrada aterrados.

Qualquer valor de tensão que surge na saída de um AO com terminais de entrada aterrados é denominado de **tensão *offset* de saída**,  $V_{Os}$ . Em geral, a tensão *offset* de um AO pode chegar a alguns milivolts.

Um dos terminais do AO, denominado de *offset null*, pode ser conectado a um circuito externo, de forma a permitir o ajuste da tensão de saída até um valor nulo, quando as entradas estiverem aterradas. Esse terminal adicional está mostrado na representação de circuito do AO da **Fig.14**.



**Fig.14** Representação de circuito de um AO com a inclusão do terminal *offset null*.

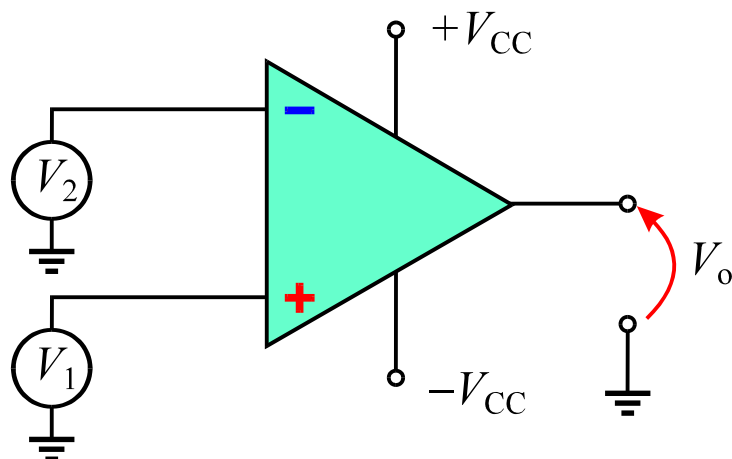
## REJEIÇÃO DE MODO COMUM

Quando as duas entradas de um AO recebem sinal, o dispositivo deveria atuar idealmente como amplificador diferencial, isto é, amplificando a diferença entre as duas tensões. Com base na **Fig.15**, considerando as tensões  $V_1$  e  $V_2$  aplicadas aos terminais (+) e (-), respectivamente, a tensão de saída do AO seria dada por

$$V_o = A_d V_d \quad (1)$$

com

$$V_d = V_1 - V_2 \quad (2)$$



**Fig.15** Tensões de entrada e saída em um amplificador operacional.

A **Eq.(1)** mostra que idealmente, se  $V_d = 0$ ,  $V_o = 0$ , ou seja, tensões idênticas aplicadas aos terminais de entrada produziram uma tensão nula na saída.

De forma precisa, em um amplificador operacional real, a tensão de saída não depende apenas da diferença de potencial entre os terminais de entrada, mas também do valor médio das tensões aplicadas a esses terminais. Conseqüentemente, a relação entre entrada e saída em um *AO* real, não pode ser representada rigorosamente pela **Eq.(1)**.

Para precisar melhor a relação entre entrada e saída de um *AO* real, define-se a tensão média de entrada pela relação

$$V_c = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (3)$$

Com a definição de tensão média dada pela **Eq.(3)**, a relação entre entrada e saída para um *AO* real pode ser generalizada na forma

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c \quad (4)$$

Das **Eqs.(2)** e **(3)**, observa-se que a condição  $V_1 = V_2$ , equivalente à aplicação de uma tensão comum a ambos os terminais, fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 0 \text{ e } V_c = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) = \frac{1}{2}2V_1 = V_1$$

e a **Eq.(4)** fornece

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d \times 0 + A_c V_1$$

$$\Rightarrow V_o = A_c V_1$$

Ou seja, aparece na saída uma tensão relacionada à amplificação da tensão média de entrada que no presente exemplo, corresponde à tensão comum a ambas as entradas. Por essa razão, o parâmetro  $A_c$  é definido como o **ganho de modo comum** do amplificador.

Um bom amplificador operacional, com características próximas às daquelas de um *AO* ideal, deve exibir um ganho de modo comum tão pequeno quanto possível, de forma que a tensão de saída seja dependente apenas da diferença de potencial entre os terminais de entrada.

Um parâmetro denominado de **razão de rejeição de modo comum**, abreviado pela sigla **CMRR**, é fornecido no folheto de especificações do fabricante, para exprimir quão pequeno é o ganho de modo comum em

comparação ao ganho diferencial. Aquele parâmetro é geralmente expresso em dB pela relação

$$CMRR = 20\log\left(\frac{A_d}{A_c}\right) \quad (5)$$

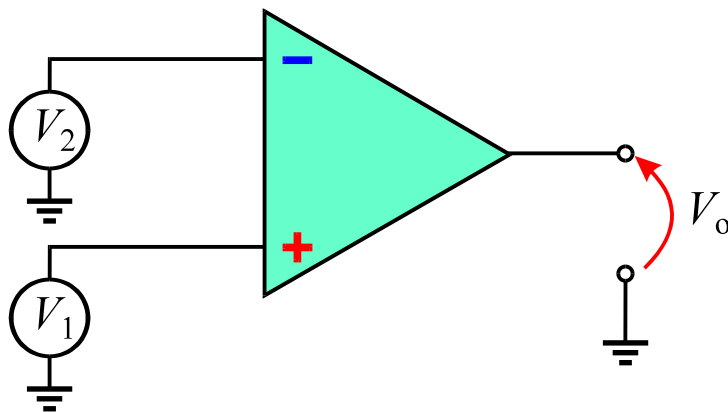
Da **Eq.(5)** nota-se que um *AO* ideal teria um ganho de modo comum  $A_c=0$ , de forma que

$$CMRR = 20\log\left(\frac{A_d}{A_c}\right) = 20\log\left(\frac{A_d}{0}\right) \rightarrow \infty, \text{ para o } AO \text{ ideal}$$

Para o *AO* real o ganho de modo comum deve ser tão pequeno quanto possível, o que equivale a um valor alto do parâmetro *CMRR*. Os exemplos a seguir ilustram a relação entre tensões em um *AO*.

**Exemplo 1:** O *AO* mostrado na **Fig.16** tem um ganho diferencial de 40 dB. Admitindo que a razão de rejeição de modo comum seja infinita, determinar a tensão  $V_o$  nos seguintes casos:

- a)  $V_1 = 1,1 \text{ V}$  e  $V_2 = 1,0 \text{ V}$ .
- b)  $V_1 = 6,1 \text{ V}$  e  $V_2 = 6,0 \text{ V}$ .



**Fig.16** Configuração de circuito utilizada no **Exemplo 1**.

Como o ganho diferencial está expresso em dB, tem-se que

$$20\log(A_d) = 40 \Rightarrow \log(A_d) = 2$$

$$\Rightarrow A_d = 10^2 = 100$$

a) Com  $V_1 = 1,1 \text{ V}$  e  $V_2 = 1,0 \text{ V}$ , e notando que a razão de rejeição de modo comum é infinita, a **Eq.(2)** fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 1,1 - 1 = 0,1 \text{ V}$$

e a **Eq.(1)** fornece

$$V_o = A_d V_d = 100 \times 0,1$$

$$\Rightarrow V_o = 10 \text{ V}$$

b) Com  $V_1 = 6,1 \text{ V}$  e  $V_2 = 6,0 \text{ V}$ , a diferença de potencial na entrada permanece a mesma, ou seja,

$$V_d = V_1 - V_2 = 6,1 - 6 = 0,1 \text{ V}$$

e a **Eq.(1)** fornece para a tensão de saída, o mesmo valor obtido no item (a)

$$\Rightarrow V_o = 10 \text{ V}$$

**Exemplo 2:** Repetir o **Exemplo 1** admitindo que o AO da **Fig.16** tenha uma razão de rejeição de modo comum de 80 dB.

Neste exemplo, a determinação da tensão de saída requer a obtenção do ganho de modo comum. Este último é obtido a partir do parâmetro *CMRR* com o uso da **Eq.(5)**, reproduzida a seguir:

$$CMRR = 20 \log \left( \frac{A_d}{A_c} \right)$$

Com  $A_d = 100$  e  $CMRR = 80 \text{ dB}$ , tem-se

$$80 = 20 \log \left( \frac{100}{A_c} \right) \Rightarrow \log \left( \frac{100}{A_c} \right) = 4 \Rightarrow \frac{100}{A_c} = 10^4 = 10.000$$

$$\Rightarrow A_c = \frac{100}{10.000} = 0,01$$



a) Com  $V_1 = 1,1 \text{ V}$  e  $V_2 = 1,0 \text{ V}$ , a **Eq.(2)** fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 1,1 - 1 = 0,1 \text{ V}$$

e da **Eq.(3)**, obtém-se o valor médio de tensão de entrada

$$V_c = \frac{1}{2}(1 + 1,1) = \frac{2,1}{2} = 1,05 \text{ V}$$

Com  $A_d = 100$  e  $A_c = 0,01$ , a **Eq.(4)** fornece

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c = 100 \times 0,1 + 0,01 \times 1,05 = 10 + 0,0105$$

$$\Rightarrow V_o = 10,0105 \approx 10,01 \text{ V}$$

b) Com  $V_1 = 6,1 \text{ V}$  e  $V_2 = 6,0$ , repetindo-se as etapas do item (a), vem

$$V_d = V_1 - V_2 = 6,1 - 6 = 0,1 \text{ V}$$

$$V_c = \frac{1}{2}(6 + 6,1) = \frac{12,1}{2} = 6,05 \text{ V}$$

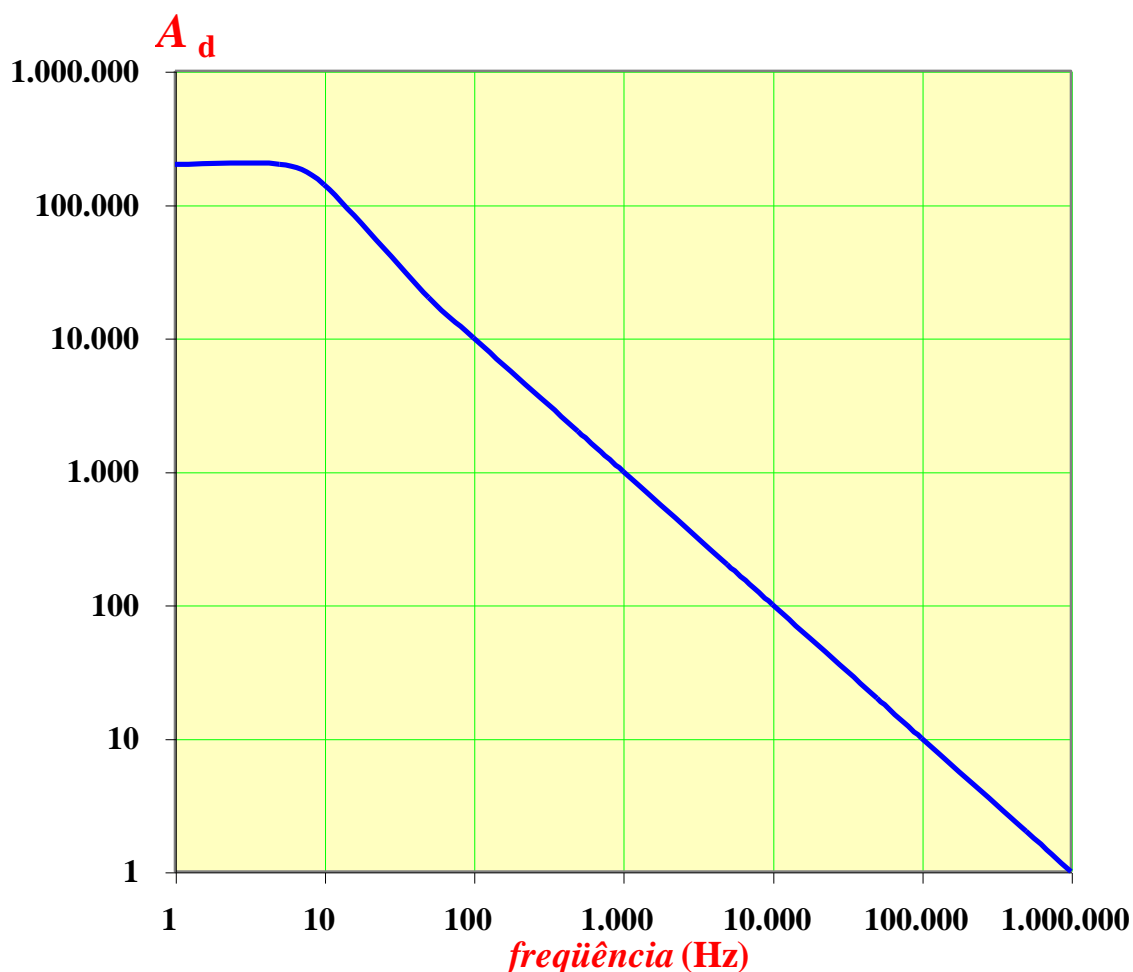
Com  $A_d = 100$  e  $A_c = 0,01$ , a **Eq.(4)** fornece

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c = 100 \times 0,1 + 0,01 \times 6,05 = 10 + 0,0605$$

$$\Rightarrow V_o = 10,0605 \approx 10,06 \text{ V}$$

## BANDA PASSANTE

O ganho diferencial  $A_d$  de um *AO* pode atingir valores da ordem de 200.000. Esse ganho, entretanto, tende a diminuir com o aumento da frequência do sinal a ser amplificado. Esse comportamento pode ser observado na **Fig. 17**, que mostra a dependência em frequência do ganho diferencial de um amplificador operacional típico em escala logarítmica.

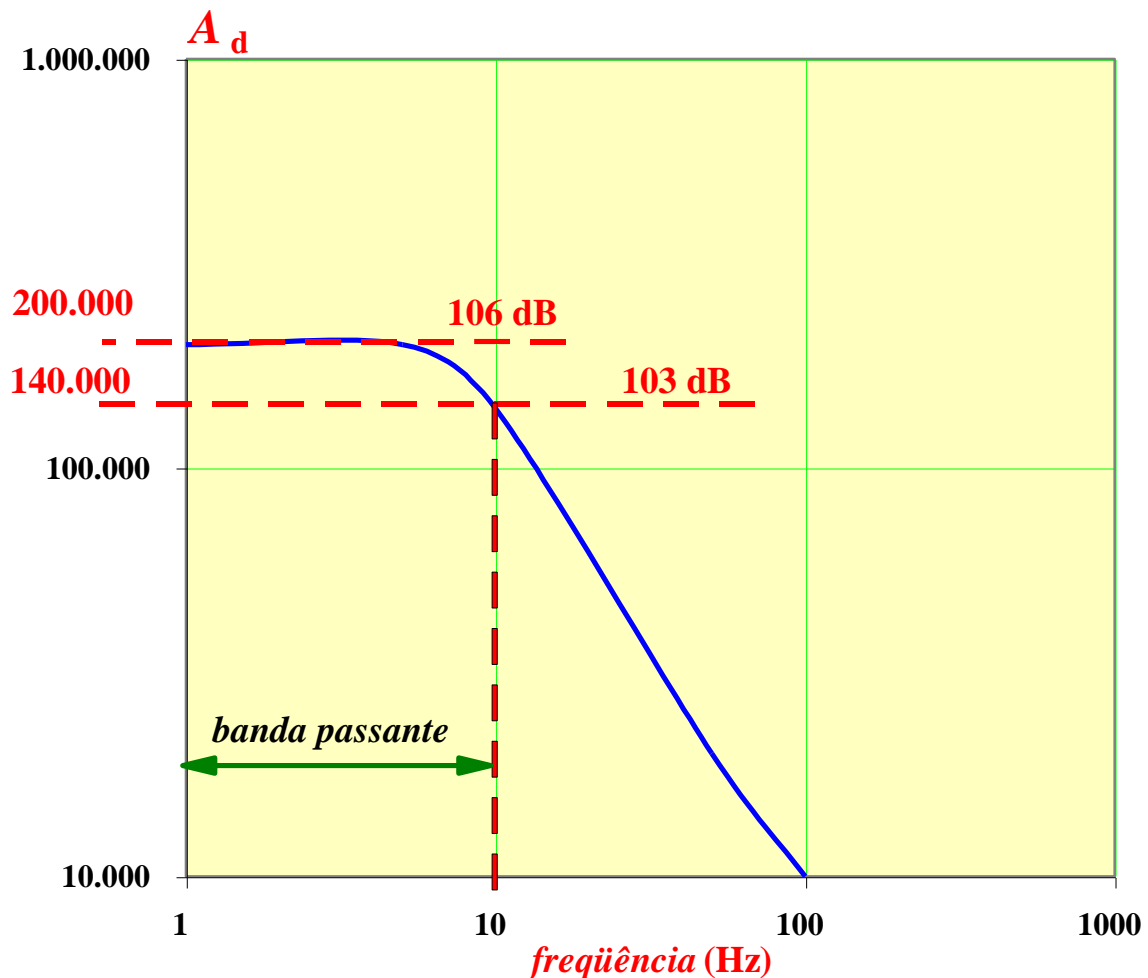


**Fig.17** Dependência em frequência do ganho diferencial de um AO.

Um exame do gráfico mostrado na **Fig.17** indica que para frequências de sinal inferiores a cerca de 5 Hz, o ganho permanece praticamente constante, no caso presente, próximo de 200.000, ou equivalentemente, 106 dB. A partir dessa frequência o ganho tende a decrescer sensivelmente atingindo um valor unitário a uma frequência de cerca de 1 MHz.

A **banda passante** do amplificador operacional é definida como a faixa de frequências de sinal em que o ganho diferencial do amplificador é superior a cerca de 70% do ganho máximo.

A **Fig.18** mostra em detalhes a região de baixas frequências do gráfico da **Fig.17**. Como pode ser aí observado, na frequência de 10 Hz, o ganho diferencial diminui para cerca de 70% do valor máximo, ou seja, 140.000. Esse valor corresponde a um ganho de 103 dB, que é 3 dB inferior ao ganho máximo. Conclui-se portanto que a banda passante do AO em questão é de 10Hz.



**Fig.18** Região de baixas frequências do gráfico da **Fig.17**.

## AMPLIFICADOR OPERACIONAL 741

Um amplificador operacional frequentemente utilizado em circuitos eletrônicos é o 741, devido ao seu baixo custo e relativamente bom desempenho. O campo de aplicações deste *AO* é tão extenso que um grande número de fabricantes de circuitos integrados produz amplificadores operacionais com características e designações praticamente idênticas, como por exemplo, MA741, LM741, MC741, SN72741, AD741 etc.

A **Tabela 1** resume os valores típicos dos parâmetros do *AO* 741 juntamente com os valores correspondentes a um *AO* ideal. Os parâmetros aí listados mostram que o 741 tem características próximas àquelas de um amplificador operacional ideal.

**Tabela 1** Parâmetros típicos do AO 741 e valores correspondentes de um AO ideal.

Parâmetro	AO ideal	741
$Z_i$	$\infty$	2 M $\Omega$
$Z_o$	0 $\Omega$	75 $\Omega$
$A_d$	$\infty$	106dB
CMRR	$\infty$	90dB

O folheto de especificações do fabricante também fornece uma série de informações adicionais, que permitem estabelecer o desempenho do componente e valores máximos admitidos para as grandezas elétricas de alimentação e entrada, bem como temperatura de operação do componente. A **Tabela 2** lista os valores máximos permitidos para os componentes da série AD741(J, K, L ou S), fabricados pela *Analog Devices*.

**Tabela 2** Valores máximos permitidos para os componentes da série AD741 (J, K, L ou S).

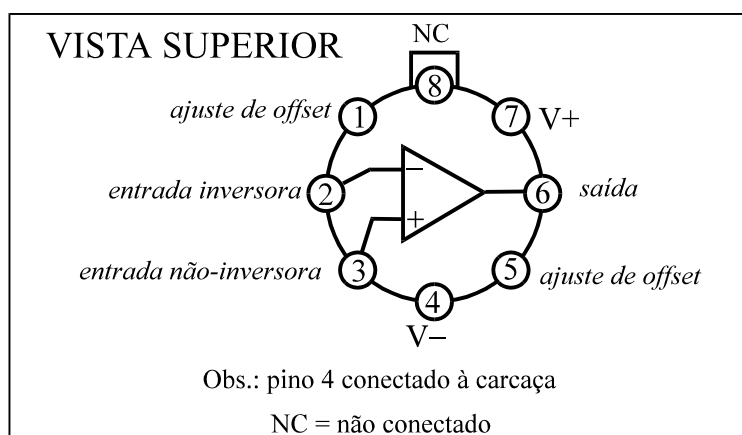
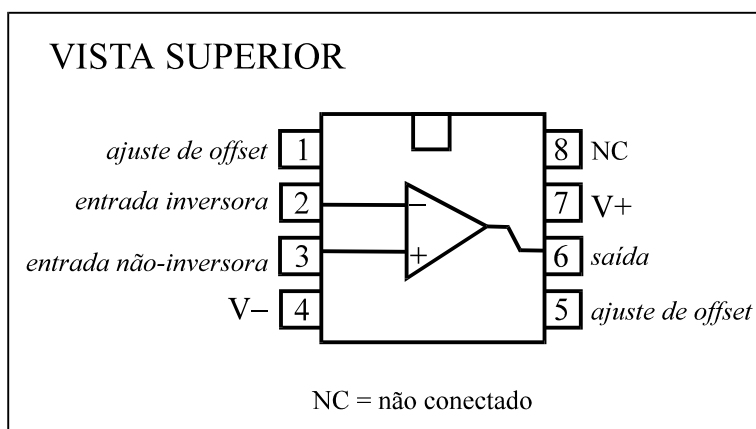
Parâmetro	Valor máximo permitido
Tensão de alimentação	$\pm 22$ V
Dissipação interna de potência	500 mW
Tensão diferencial de entrada <sup>1</sup>	$\pm 30$ V
Tensão de entrada <sup>2</sup>	$\pm 15$ V
Faixa de temperatura durante armazenagem	- 65 °C a 150 °C
Temperatura durante soldagem ( até 60 seg)	+ 300 °C
Duração de curto-circuito na saída	Indefinido
Temperatura de operação	70 °C

<sup>1</sup> Máxima diferença de potencial entre terminais de entrada.

<sup>2</sup> Máxima tensão que pode ser aplicada entre um dos terminais de entrada e o terra, não devendo exceder a tensão de alimentação.

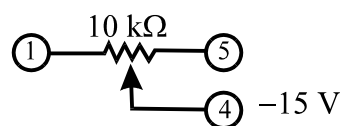
## AJUSTE DE *OFFSET* DO AO 741

A **Fig.19** mostra a disposição dos terminais do AD741 nos encapsulamentos circular e DIL. Como pode ser aí observado, existem dois terminais que são utilizados para o ajuste da tensão *offset* na saída.

*Circular**DIL*

**Fig.19** Disposição dos terminais do AD741 para dois tipos de encapsulamento.

O procedimento recomendado pelo fabricante para a efetuação do ajuste de *offset* é mostrado na **Fig.20**. A técnica utiliza um potenciômetro de 10k $\Omega$  conectando ambos os terminais, com o terminal ajustável do potenciômetro conectado diretamente ao terminal  $-V_{CC}$  da fonte de alimentação. Dessa forma, aterrando-se os terminais de entrada, ajusta-se o potenciômetro até o ponto em que a tensão de saída se reduz a um valor nulo.

*ajuste de offset*

**Fig.20** Procedimento de ajuste da tensão *offset* do AD741.

# Apêndice

## QUESTIONÁRIO

1. Desenhe a representação de circuito de um *AO* e identifique os seus terminais.
2. Qual é a relação de fase entre o sinal de saída e o sinal de entrada em um *AO* nos seguintes casos:
  - (a) sinal aplicado ao terminal não inversor.
  - (b) sinal aplicado ao terminal inversor.
3. Que parâmetros são utilizados para caracterizar um *AO*?
4. Descreva o significado dos parâmetros obtidos na questão anterior.
5. Como é definida a banda passante de um *AO*?
6. Repetir o **Exemplo 1** admitindo que o *AO* tenha um ganho diferencial de 30 dB.
7. Repetir o **Exemplo 2** admitindo que o *AO* tenha um ganho diferencial de 30 dB e uma razão de rejeição de modo comum de 40 dB.

## BIBLIOGRAFIA

LANDO, Roberto Antônio & ALVES, Sérgio Rios, Amplificador operacional, São Paulo, Érica, 1983.

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica, São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1986.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, Mc Graw- Hill do Brasil, São Paulo, 1981.