

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.

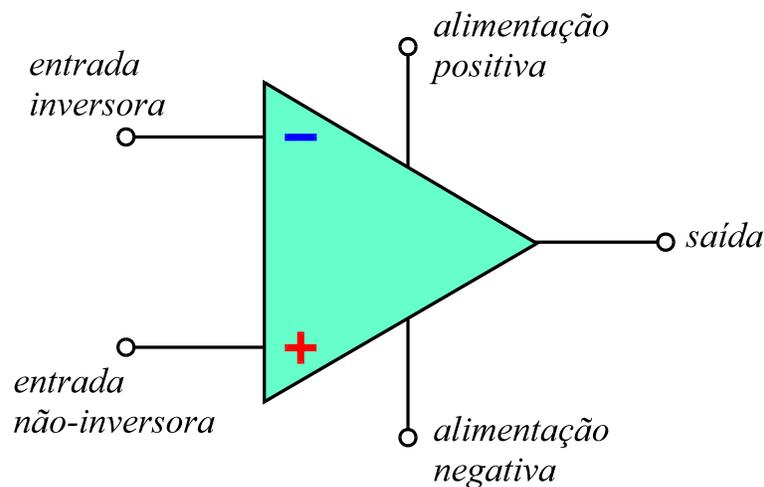


Fig.1 Representação de circuito de um amplificador operacional.

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.

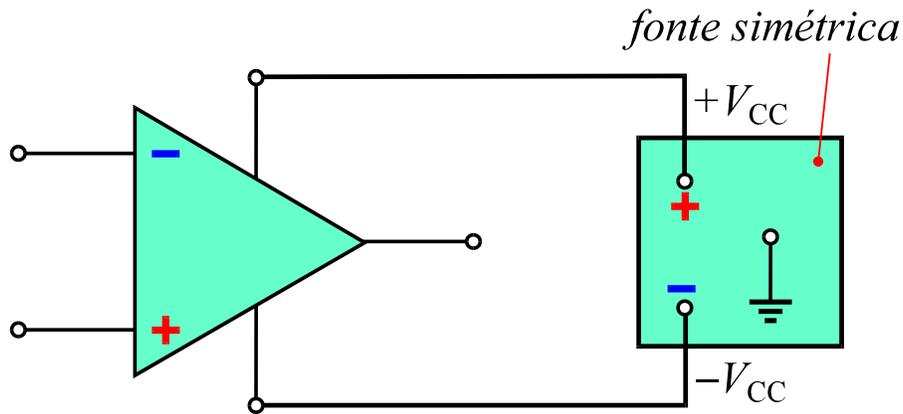


Fig.2 Forma de alimentação de um AO.

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**.

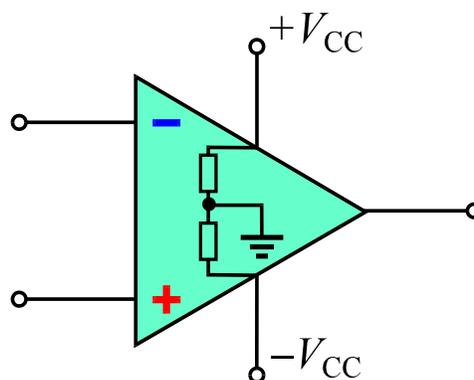


Fig.3 Diagrama da estrutura interna de um AO.

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**.

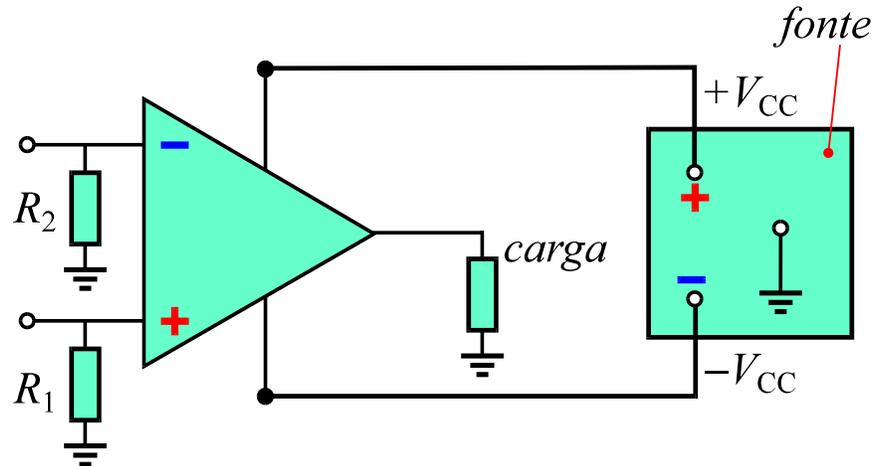


Fig.4 Amplificador operacional conectado a um circuito com fonte simétrica.

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° 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**.

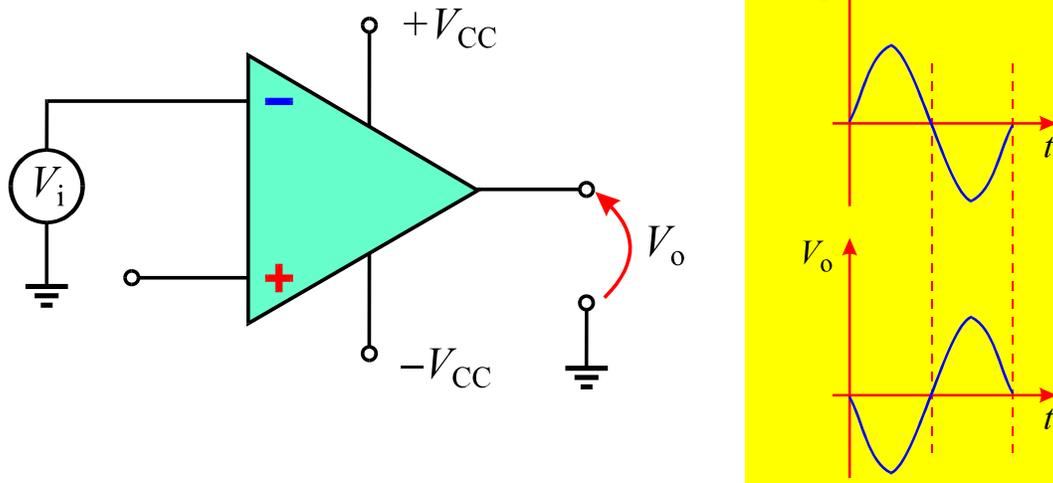


Fig.5 Relação entre os sinais de entrada e saída de um *AO* para um sinal aplicado à entrada inversora do dispositivo.

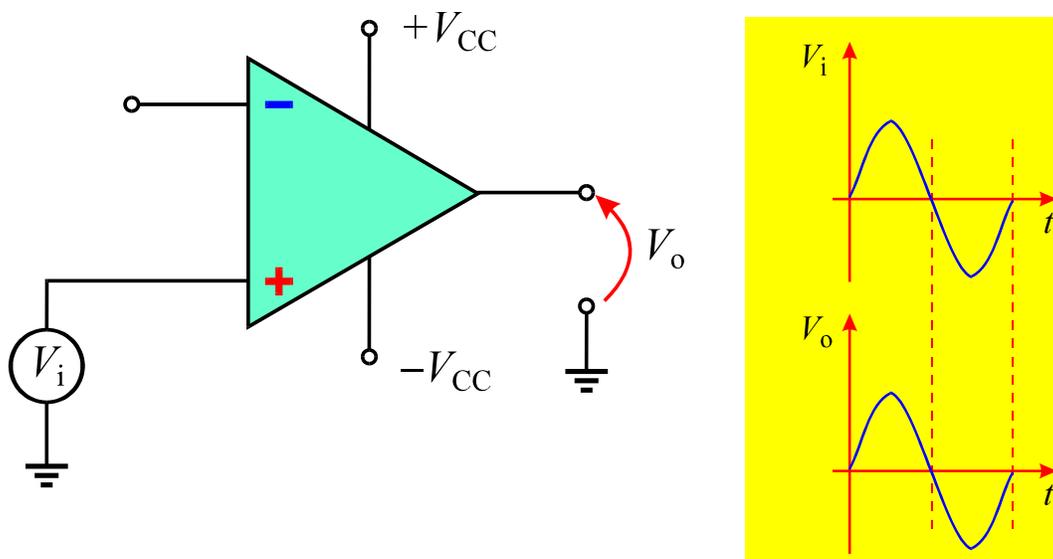


Fig.6 Relação entre os sinais de entrada e saída de um *AO* para um sinal aplicado à entrada não inversora do dispositivo.

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**.

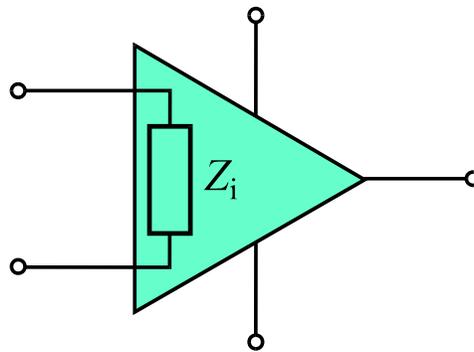


Fig.7 Representação do parâmetro Z_i de um *AO*.

Idealmente o *AO* deveria ter terminais de entrada totalmente isolados, e conseqüentemente, o *AO* ideal deve exibir um 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 .

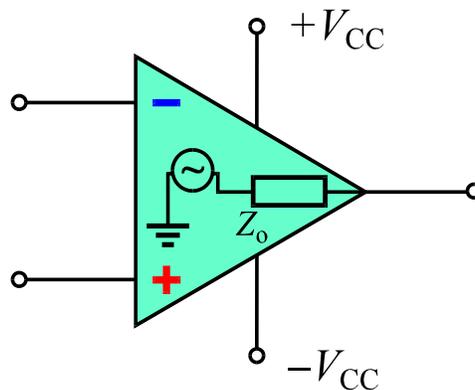


Fig.8 Representação do parâmetro Z_o de um *AO*.

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**.

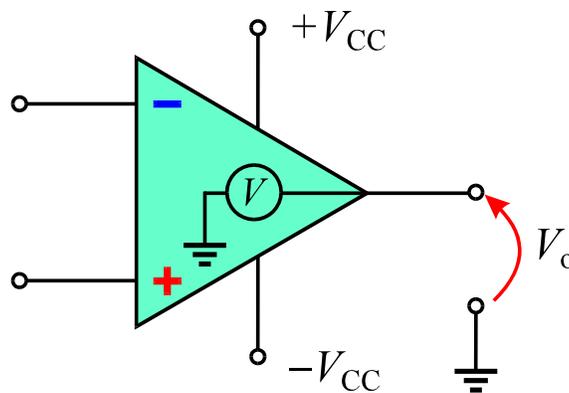


Fig.9 Modelo de circuito para a saída de um *AO* ideal.

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

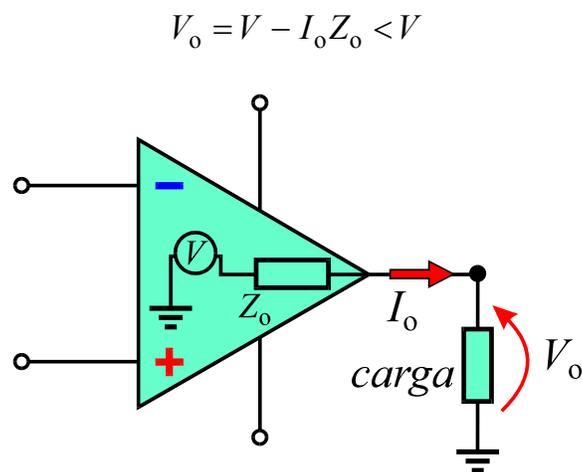


Fig.10 Parâmetros elétricos de um *AO* real com saída conectada à carga.

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.

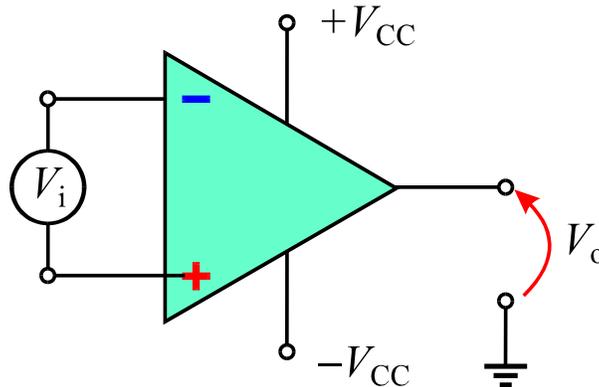


Fig.11 *AO* configurado como amplificador diferencial.

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.

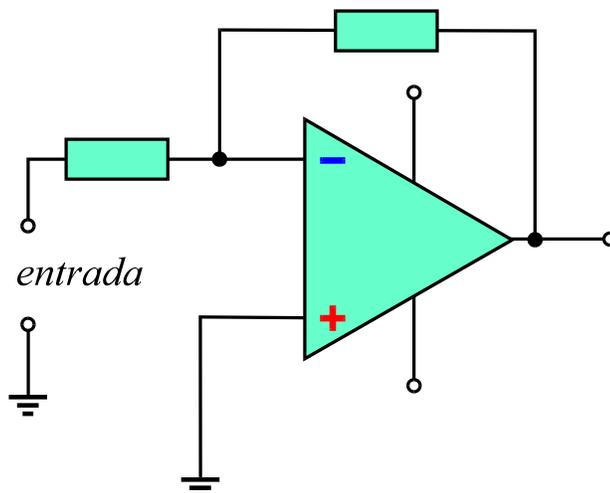


Fig.12 *AO* configurado com elementos de realimentação.



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.

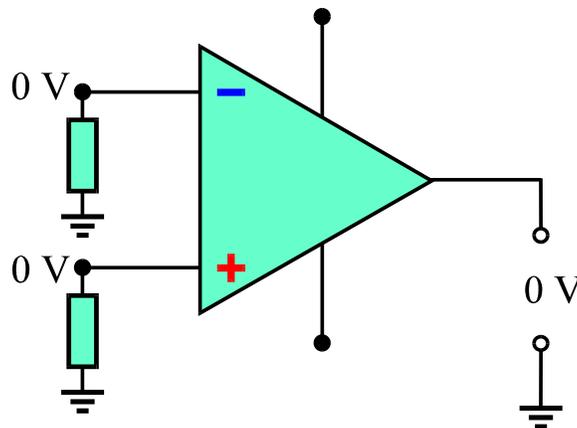


Fig.13 *AO* ideal com os dois terminais de entrada aterrados.

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**.

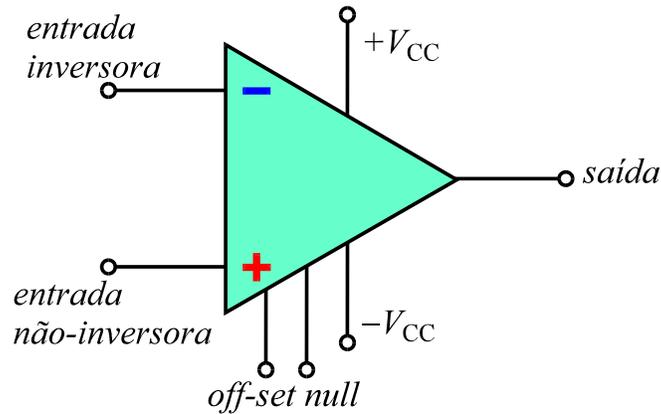


Fig.14 Representação de circuito de um AO com a inclusão do terminal *offset null*.

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

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

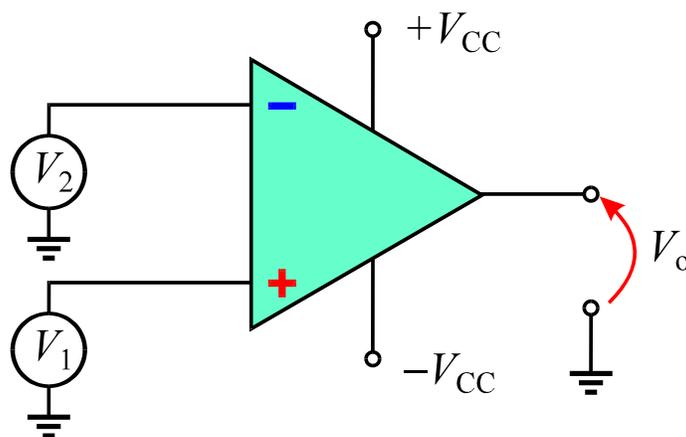


Fig.15 Tensões de entrada e saída em um amplificador operacional.

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

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

$$\boxed{\Rightarrow V_o = A_c V_1}$$

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 àquelas 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:

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

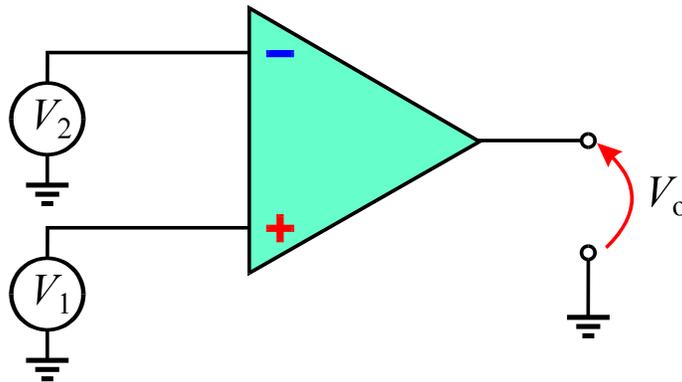


Fig.16 Configuração de circuito utilizada no **Exemplo 1**.

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 $V_1 = 1,1$ V e $V_2 = 1,0$ 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 $V_1 = 6,1$ V e $V_2 = 6,0$ 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 $CMRR = 80$ 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 $V_1 = 1,1$ V e $V_2 = 1,0$ V, a **Eq.(2)** fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 1,1 - 1 = 0,1$$
 V

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

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

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

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

$$\Rightarrow V_o = 10,0105 \approx 10,01$$
 V

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

$$V_d = V_1 - V_2 = 6,1 - 6 = 0,1$$
 V

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

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

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

$$\Rightarrow V_o = 10,0605 \approx 10,06$$
 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.

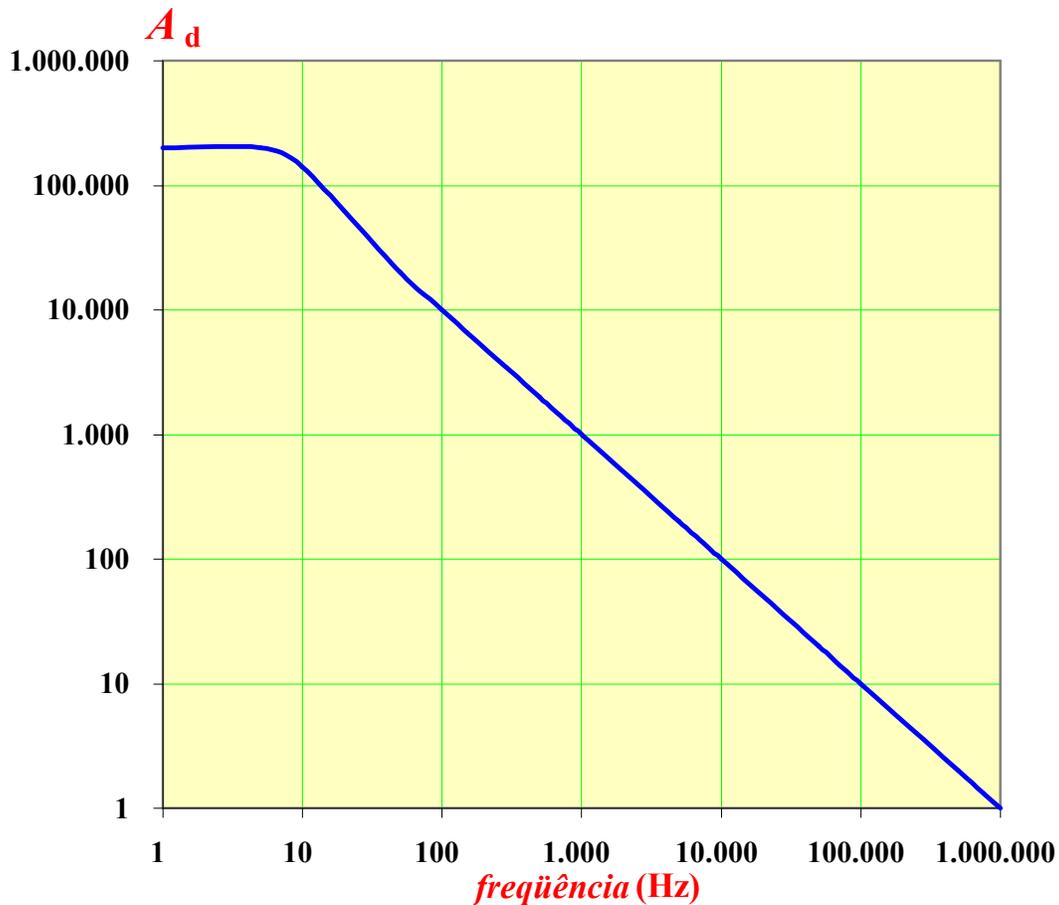


Fig.17 Dependência em frequência do ganho diferencial de um AO.

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.

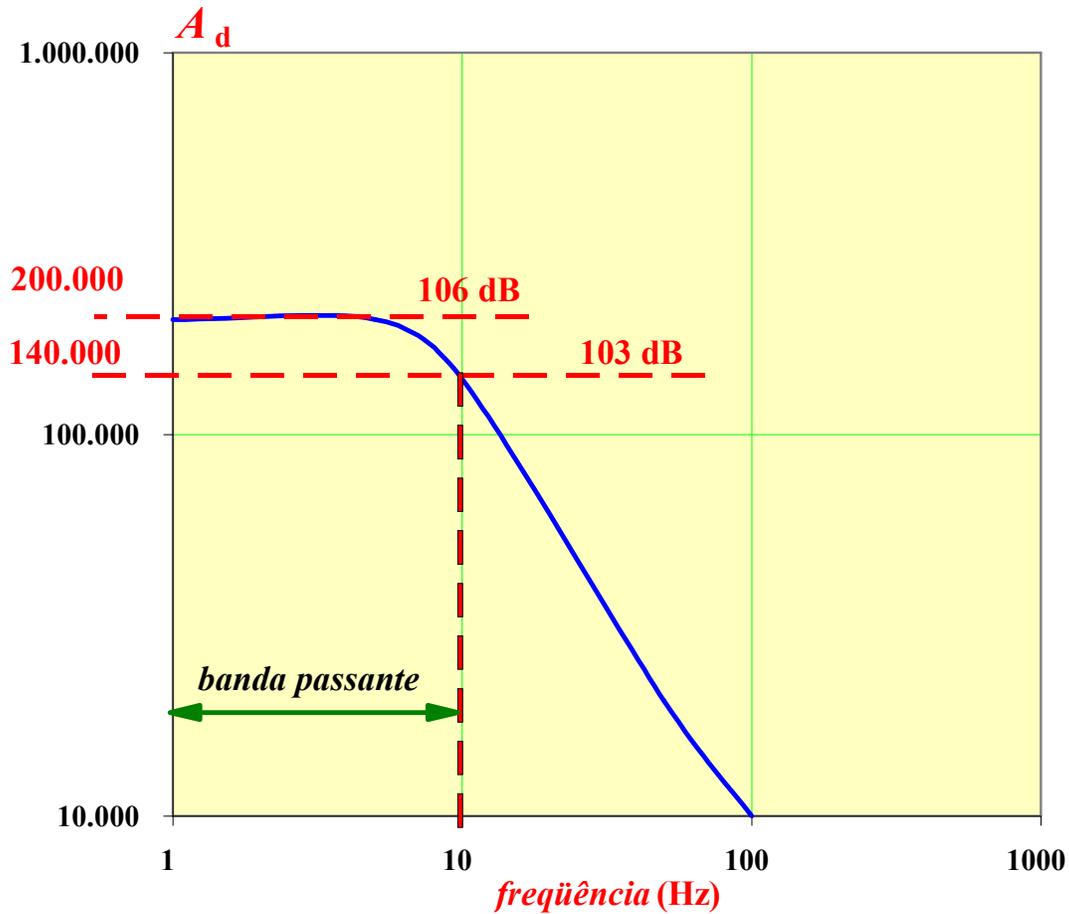


Fig.18 Região de baixas frequências do gráfico da Fig.17.

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	<i>AO</i> ideal	741
Z_i	∞	2 M Ω
Z_o	0 Ω	75 Ω
A_d	∞	106dB
<i>CMRR</i>	∞	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	± 22 V
Dissipação interna de potência	500 mW
Tensão diferencial de entrada ¹	± 30 V
Tensão de entrada ²	± 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

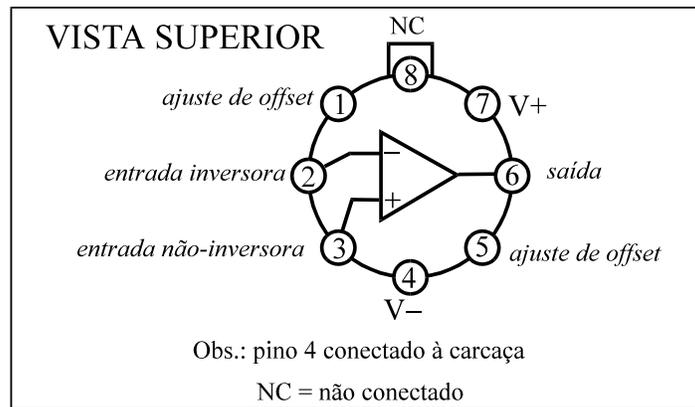
¹ Máxima diferença de potencial entre terminais de entrada.

² 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

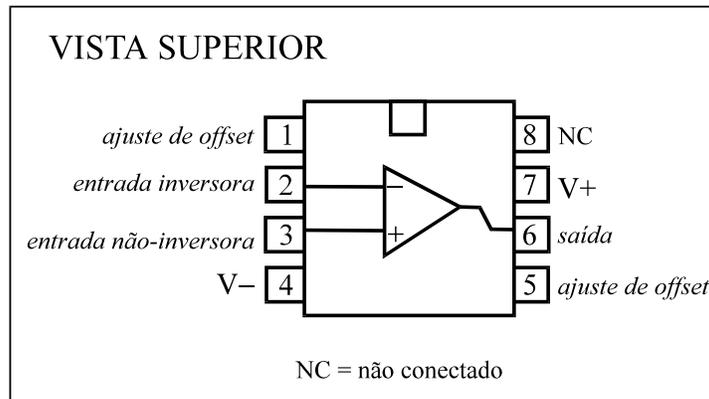


Fig.19 Disposição dos terminais do AD741 para dois tipos de encapsulamento.

O procedimento recomendado pelo fabricante para a efetuação do ajuste de *offset* é mostrado na **Fig.20**. A técnica utiliza um potenciômetro de $10\text{k}\Omega$ 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.

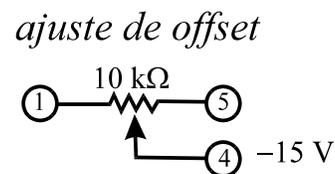


Fig.20 Procedimento de ajuste da tensão *offset* do AD741.

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.