



EXPERIÊNCIA 5: CIRCUITOS COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

INTRODUÇÃO TEÓRICA

Edição 2023

Profs A. Serrano; V. Nascimento

Rev. 2018: L. Yoshioka; E. Galeazzo; A.C. Seabra

Rev. 2021: Profs. Marcio Lobo e Verônica Ch. Abê / 2023:MNPC

1. OBJETIVO

Entender o funcionamento de um amplificador operacional ideal; aplicar leis de Kirchhoff para resolver circuitos com amplificadores operacionais ideais.

2. AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Amplificadores são dispositivos ativos<sup>1</sup> capazes de aumentar a amplitude dos sinais. Estão presentes em muitos sistemas eletrônicos, desempenhando funções essenciais. Em especial, os Amplificadores Operacionais (AmpOp) são extremamente versáteis e possuem amplas possibilidades de aplicações em eletrônica e computação. Os AmpOps são capazes de produzir tensões de saída centenas ou milhares de vezes superiores às tensões dos terminais de entrada. O diagrama da Fig. 1 mostra a representação esquemática de um AmpOp.

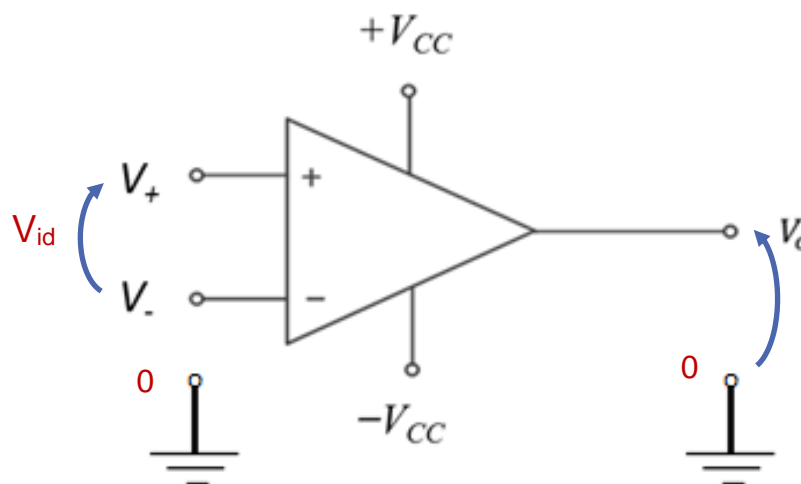


Figura 1 – Representação esquemática de um Amplificador Operacional.

<sup>1</sup> *Dispositivos ativos* são aqueles capazes de fornecer uma energia maior na saída do que a energia que entrou. Isso é possível porque o dispositivo é alimentado por uma fonte externa ou alimentação.

As nomenclaturas utilizadas na Figura 1 são:

- O terminal “V<sub>+</sub>” é a entrada “não inversora” do AmpOp, medida em relação ao terminal de referência 0;
- O terminal “V<sub>-</sub>” é a “entrada inversora” do AmpOp, também medida em relação ao terminal de referência 0;
- V<sub>id</sub> é a tensão diferencial entre V<sub>+</sub> e V<sub>-</sub>, ou seja, V<sub>id</sub> = V<sub>+</sub> – V<sub>-</sub>.
- V<sub>o</sub> é a tensão de saída do AmpOp, também medida em relação ao terminal de referência 0;
- +V<sub>cc</sub> e –V<sub>cc</sub> são as tensões de alimentação em CC (simétricas). Note que não se liga o terminal de referência 0 ao AmpOp.

## 2.1 Definição de ganho de tensão (A<sub>v</sub>) em circuitos

O ganho de tensão (**A<sub>v</sub>**) em um circuito é um parâmetro que nos dá uma ideia da relação entre a amplitude da tensão de saída e a amplitude da tensão de entrada. Quando o ganho de tensão do circuito é maior que 1, significa que o circuito amplificou o sinal. Quando o ganho de tensão do circuito é menor do que 1, significa que o circuito atenuou o sinal. Notem que nos circuitos resistivos (exemplo um circuito divisor resistivo) o ganho A<sub>v</sub> será constante, independente da frequência. Como visto na experiência “Resposta em Frequência”, se o circuito possuir elementos reativos (capacitâncias ou indutâncias) o ganho de tensão poderá variar de acordo com a frequência.

## 2.2 Ganho de Tensão (A) do Amplificador Operacional (Ganho de tensão “em malha aberta”)

Um dos parâmetros que caracteriza o AmpOp é o ganho de tensão, **A**, definido pela relação entre a tensão de saída (V<sub>o</sub>) e a tensão de entrada (V<sub>id</sub>) (Figura 1), sendo esta caracterizada pela diferença entre as tensões dos seus terminais, V<sub>+</sub> e V<sub>-</sub>, como indicado em (1).

$$A = \frac{V_o}{V_{id}} = \frac{V_o}{V_+ - V_-} \quad (1)$$

Num AmpOp **ideal** o ganho “**A**” é infinito. Na prática, o ganho “**A**” é um valor bem elevado, que pode ser da ordem de algumas centenas a dezenas de milhares de volts por volts. Observem que pelo fato da tensão de saída do AmpOp ser limitada pela tensão de alimentação ( $\pm V_{cc}$ ), e assumindo-se que seu ganho (A) é da ordem de 10<sup>4</sup> a 10<sup>6</sup>, conclui-se que V<sub>+</sub> – V<sub>-</sub> ≈ 0.

## Representação do ganho em decibéis (dB)

O ganho é um parâmetro que pode assumir valores da ordem de unidades até centenas de milhares de volts por volts. Assim sendo, será conveniente escolher a melhor forma de sua representação: linear ou decibéis (dB). Para variações de uma ou duas ordens de grandeza costuma-se

utilizar a representação linear. Por outro lado, para variações de três ordens de grandezas ou superior prefere-se utilizar a representação em decibéis. O ganho em decibéis é definido pela expressão a seguir:

$$A_{dB} = 20 \log A \quad (1a)$$

A Tabela 1 mostra exemplos de representação de ganho no formato linear e no formato logarítmico.

**Tabela 1:** Ganho linear x Ganho em decibéis

A	A (dB)
0,001	- 60
0,01	- 40
0,05	- 26
0,1	- 20
0,707	- 3
1	0
5	14
10	20
20	26
50	34
80	30
100	40
1000	60
10000	80

### 2.3 Impedância de entrada

Em AmpOps ideais, as correntes nos ramos de entrada (entrada não-inversora  $V_+$  e entrada inversora  $V_-$ ) são consideradas nulas. Desse ponto de vista pode-se concluir que a impedância  $Z_{in}$  vista entre  $V_+$  e  $V_-$ , chamada de impedância de entrada do AmpOp, é infinita. Ressalta-se que na maioria das vezes é suficiente considerarmos apenas a parte resistiva da impedância, ou seja, consideramos que  $Z_{in} = R_{in}$ . Portanto, o valor do  $R_{in}$  é idealmente infinito, sendo na prática da ordem de vários megahms.

**Exemplo 1 – Circuito inversor com AmpOp ideal**

Um circuito inversor é aquele em que o ganho de tensão do circuito é negativo. Por exemplo, um circuito com ganho “- 2” terá uma tensão de saída que corresponderá à tensão de entrada multiplicada por dois e “invertida”, que no caso de um sinal senoidal corresponderá a uma defasagem  $\pm 180^\circ$ .

Consideremos o circuito mostrado na Fig. 2, sendo o ganho do AmpOp igual a “A”.

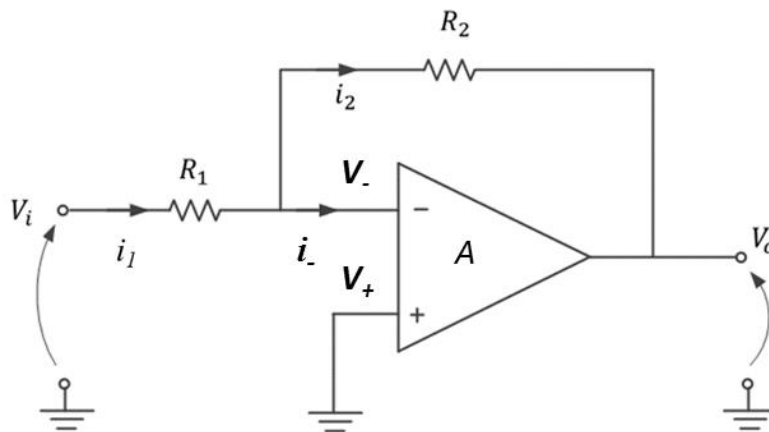


Figura 2 – Circuito inversor utilizando Amplificador Operacional.

Nesse exemplo, vamos supor que o AmpOp seja ideal, desta forma:  $R_{in} \rightarrow \infty$  e  $A \rightarrow \infty$ .

Como  $R_{in} \rightarrow \infty$ , a corrente  $i_-$  que está indicada na Fig. 2 entrando pelo terminal “V.” do AmpOp será nula, ou seja,  $i_- = 0$ . Com isso, pela lei dos nós,  $i_1 = i_2$ .

Por outro lado, como  $A \rightarrow \infty$  e assumindo-se que a tensão de saída do AmpOp ( $V_o$ ) é finita, resulta que  $V_+ - V_- = 0$ , já que  $V_o = A(V_+ - V_-)$ . Conclui-se então que, no caso do AmpOp ideal, temos  $V_+ = V_-$ . Chamamos esta condição de “curto-circuito virtual”.

No caso particular da Figura 2, como  $V_+ = 0 V$  (seu terminal está aterrado), então  $V_- = 0 V$ . Dizemos então que temos um “terra virtual” no terminal V. (note que este é um caso particular do “curto-circuito virtual”).

Assim,  $i_1 = \frac{V_i - 0}{R_1}$  e  $i_2 = \frac{0 - V_o}{R_2}$ . E como também  $i_2 = i_1$ , podemos escrever que:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \tag{2}$$

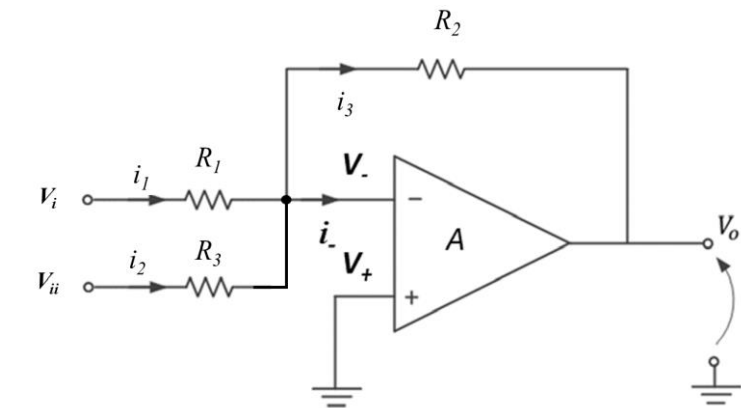
Ou seja, a tensão de saída ( $V_o$ ) é igual à tensão de entrada multiplicada pelo fator  $-\frac{R_2}{R_1}$ . Por exemplo, se  $R_1 = R_2$  teremos que:  $V_o = -V_i$ .

Da mesma forma que definimos o ganho de tensão do AmpOp em malha aberta (A), podemos também definir o ganho de tensão do circuito. O ganho de tensão do circuito “ $A_v$ ” será:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \tag{2.a}$$

### Exemplo 2 – Circuito Amplificador Somador Inversor

Neste circuito, dois ou mais sinais são aplicados à entrada do *AmpOp* inversor. O sinal de saída será a soma dos sinais de entrada amplificados. No exemplo abaixo, dois sinais são aplicados à entrada e teremos a tensão indicada em (2.b) como saída:



$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}V_i - \frac{R_2}{R_3}V_{ii} \quad (2.b)$$

*O que achou das análises que acabamos de apresentar nos exemplos 1 e 2? Se ainda ficou confuso para você, não se preocupe, pois embora cada um dos passos seja simples, foram introduzidos conceitos que não são intuitivos, como, por exemplo, o “curto-circuito virtual”. Vamos apresentar a seguir outro conceito que é o gerador vinculado.*

### 3. MODELO EQUIVALENTE DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A análise feita no item 2 é elegante, porém considera que  $\mathbf{A} \rightarrow \infty$  (daí o surgimento do “curto-circuito virtual”, que muito simplificou a análise). No entanto, como você verá ao longo do seu curso, nem sempre podemos considerar o AmpOp ideal. Surge então a necessidade de considerar  $\mathbf{A} \neq \infty$ . Para isso, opta-se por estabelecer um modelo equivalente de circuito para o AmpOp que possa ser utilizado em quaisquer circuitos lineares. Para tanto, vamos utilizar um tipo de dispositivo visto em Circuitos Elétricos que é o “**gerador vinculado controlado por tensão**”. O gerador vinculado controlado por tensão é um tipo especial de gerador, onde a tensão de saída deste elemento é determinada por outra tensão (do circuito) e multiplicada por um fator (que denominaremos de ganho), como mostrado na Figura 3.

A tensão “ $V_1$ ” indicada na Figura 3a é uma tensão de alguma outra parte do circuito que é escolhida de acordo com o interesse. A grandeza “ $A$ ” é um fator de multiplicação do gerador vinculado. Apenas para efeito de comparação, a representação utilizada na teoria de Circuitos Elétricos é indicada na Figura 3b.

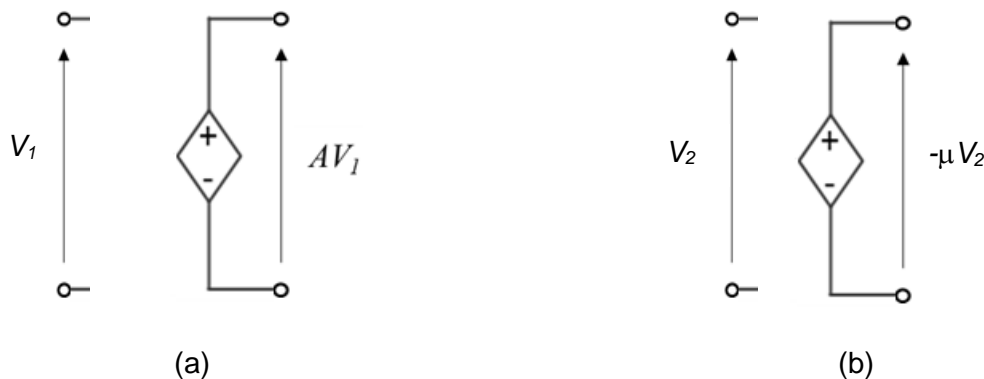
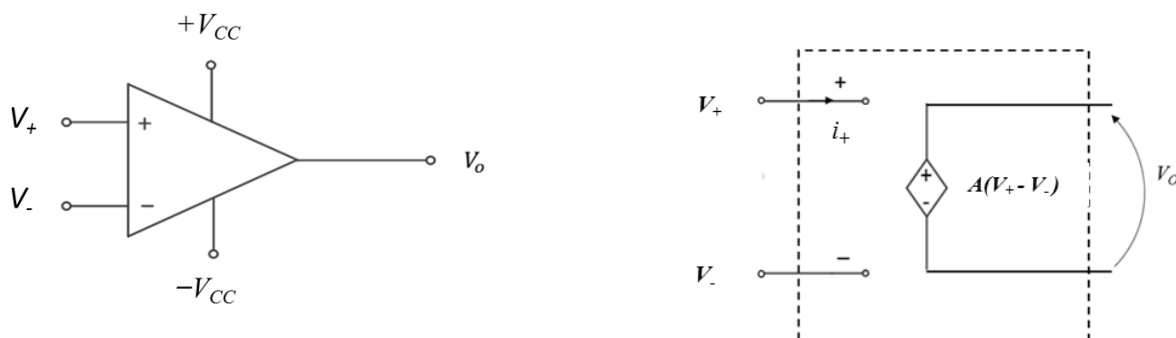


Figura 3 - Gerador Vinculado Controlado por Tensão.

Vamos agora representar o AmpOp através do seu modelo equivalente, utilizando um “gerador vinculado controlado por tensão”. A Figura 4 mostra as duas formas de se representar um AmpOp. Note que  $V_o = A \cdot V_{id} = A (V_+ - V_-)$  nas duas representações da Figura 4.



(a) Representação esquemática do AmpOp. (b) Modelo equivalente do AmpOp utilizando gerador vinculado.

Figura 4 - Representações do AmpOp.

#### 4. CIRCUITO AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO NEGATIVA, CONSIDERANDO-SE GANHO DE TENSÃO FINITO DO AMPOP

Vamos analisar mais uma vez o comportamento do circuito inversor amplificador da Figura 2, substituindo o AmpOp pelo seu modelo equivalente, ou seja, por um gerador de tensão controlado por tensão, como ilustrado na Figura 4b, e considerar que o ganho do AmpOp (**A**) é finito.

Neste caso, o gerador de tensão controlado por tensão, que modela o amplificador operacional ideal, gera em sua saída ( $V_o$ ) uma tensão proporcional à  $V_{id}$  (onde  $V_{id} = V_+ - V_-$ ). Como indicado no item 3,  $v_o(t) = \mathbf{A} \cdot v_{id}(t)$ , sendo **A** o fator de amplificação do AmpOp.

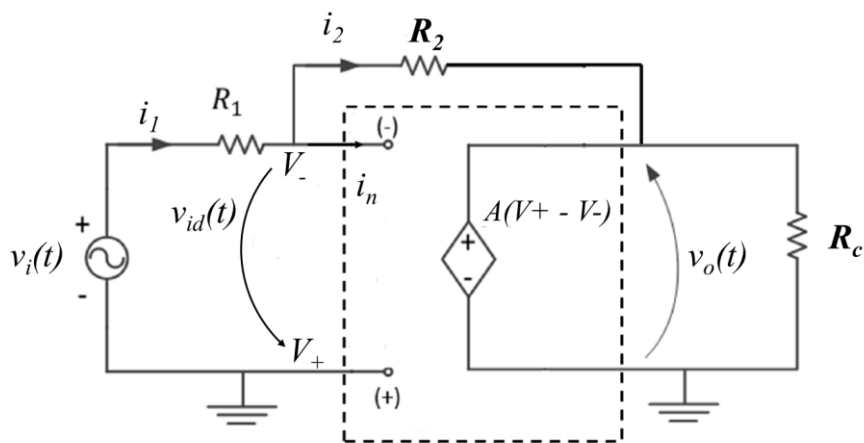


Figura 5 - Circuito inversor com AmpOp representado pelo modelo equivalente.

A Figura 5 apresenta o circuito inversor amplificador com o modelo equivalente do AmpOp. Neste circuito, a entrada positiva do amplificador operacional,  $V_+$ , está aterrada, logo  $V_+ = 0$ . Também, pela malha de saída,  $v_o(t) = A \cdot v_{id}(t)$ . Logo  $v_o(t) = A \cdot (V_+ - V_-) = -A \cdot V_-$  ou:  $V_- = -v_o(t) / A$

Adicionalmente, como  $i_- = 0 \rightarrow i_1 = i_2$ , temos:  $\frac{v_i - V_-}{R_1} = \frac{V_- - v_o}{R_2} \rightarrow \frac{v_i + v_o/A}{R_1} = \frac{-v_o/A - v_o}{R_2}$

Resulta que:

$$\frac{v_o}{v_i} = - \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)} \right) \tag{3}$$

Observe que, se o valor do ganho do AmpOp, “**A**”, for muito elevado, a expressão 3 se aproximará da expressão 2. O ponto importante a ser destacado aqui é que, para valores elevados de “**A**”, o ganho do circuito será definido somente pelos valores de  $R_1$  e de  $R_2$ .

### 5. CIRCUITO INTERNO DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Um AmpOp comercial muito comum é o 741. Foi desenvolvido pela Fairchild Semiconductor em 1968 e é ainda utilizado nos dias de hoje. A Fig. 6 mostra o circuito interno de um AmpOp 741.

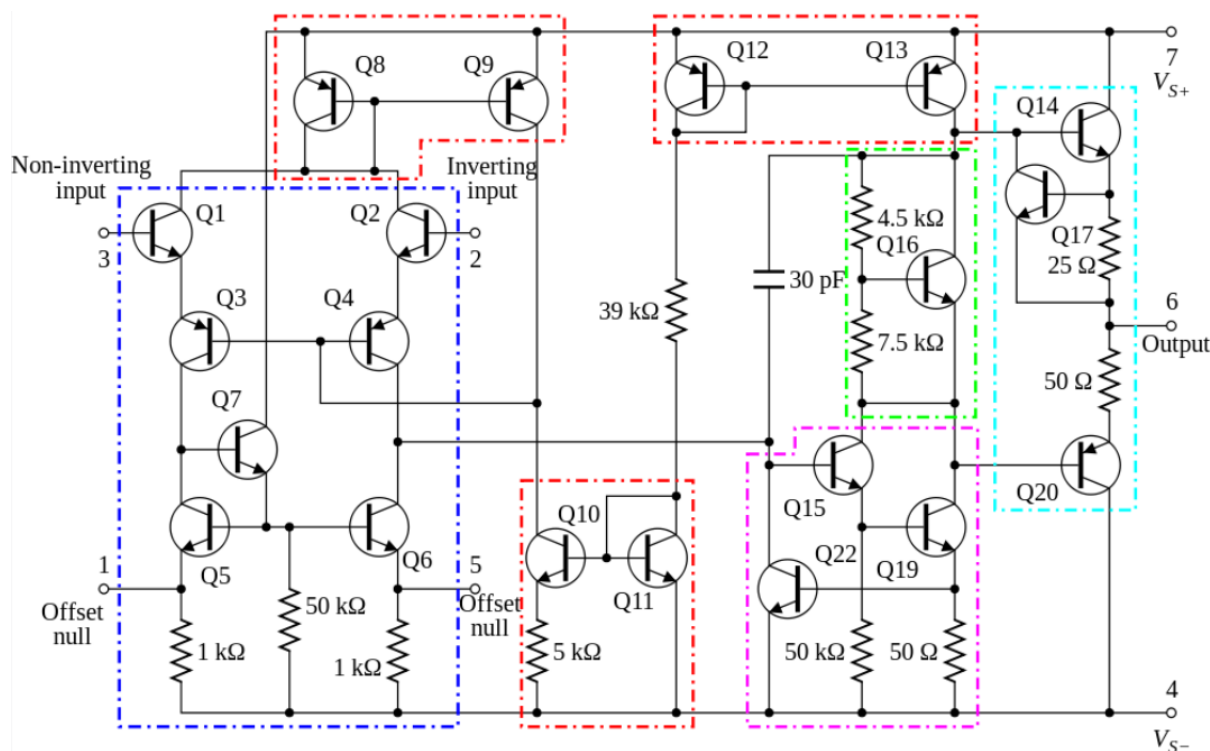


Figura 6 – Diagrama elétrico do AmpOp 741 (Fairchild).

Com relação à Figura 6 observe que, para a análise do AmpOp neste experimento, estaremos interessados apenas em modelar o comportamento da saída  $v_o$  do dispositivo em relação aos sinais de entrada ( $v_+$  e  $v_-$ ). Para isso podemos utilizar o modelo apresentado no item 3 sem se aprofundar no circuito interno real (o que será visto em disciplinas posteriores). Cabe notar, no entanto, que existe um capacitor no circuito da Figura 6 (identifique-o na figura). Esse capacitor introduz no ganho “A” uma resposta em frequência similar ao de um circuito RC passa baixas, o que significa que o ganho “A” do AmpOp diminui com o aumento da frequência. Podemos analisar o efeito desse “RC” substituindo “A” da equação (3) por uma expressão adequada dependente da frequência.