



PSI 3031/3212 - LABORATÓRIO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

EXPERIÊNCIA 06 – CIRCUITOS COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

ELABORAÇÃO: PROFS ARIANA S. VITOR N.

REVISÃO: PROFS LEOPOLDO Y. E ELISABETE G.

Edição 2018

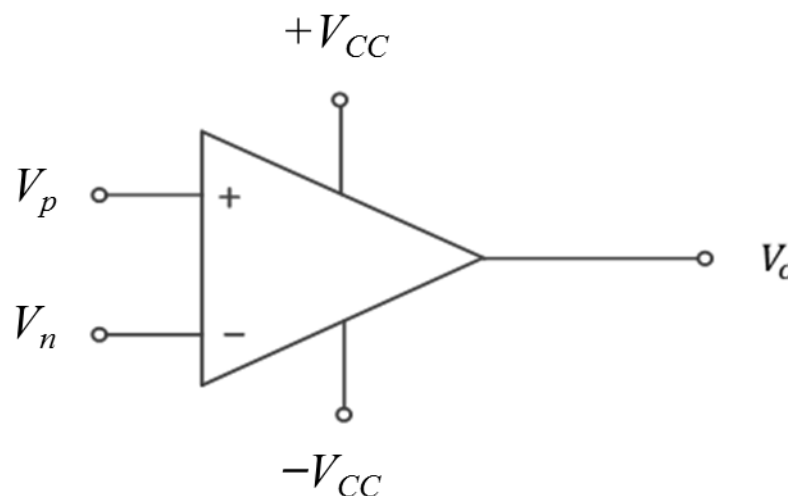
PARTE 1 - INTRODUÇÃO TEÓRICA

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 ativos¹ 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 superior às tensões dos terminais de entrada. O diagrama da Fig. 1 mostra a representação esquemática de um AmpOp.



¹ *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.

Figura 1 – Representação esquemática de um Amplificador Operacional

- O terminal “ V_p ” é a entrada “não inversora”
- O terminal “ V_n ” é a “entrada inversora”
- V_o é a tensão de saída
- $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ são as tensões de alimentação (simétricas)

2.1 Definição de Ganho:

O “ganho” é um parâmetro que nos dá uma ideia da relação entre a amplitude da tensão de saída com relação à tensão de entrada. Quando o ganho do circuito é maior que 1, significa que o circuito amplificou o sinal. Quando o ganho do circuito é menor do que 1, significa que o circuito atenuou o sinal. Notem que nos circuitos resistivos o ganho será constante, independente de frequência. Como foi visto na experiência passada, “Resposta em Frequência”, se o circuito possuir elementos reativos (capacitância ou indutância) o ganho poderá variar de acordo com a frequência.

2.2 Ganho de malha aberta

Um dos parâmetros que caracteriza o AmpOp é o ganho, **G**, definido pela relação entre a tensão de saída V_o e a tensão de entrada, dada pela diferença entre as tensões dos seus terminais V_p e V_n , como indicado em (1).

$$G = \frac{V_o}{V_p - V_n} \quad (1)$$

Num AmpOp ideal o ganho G é infinito. Na prática, o ganho em tensão é um valor bem elevado, que pode ser da ordem de algumas centenas a dezenas de milhares de volts por volts. Observem que como a tensão de saída do AmpOp é limitada pela tensão de alimentação ($\pm V_{cc}$), e assumindo-se que seu ganho é da ordem de 10^4 a 10^6 , conclui-se que $V_p - V_n \approx 0$.

Representação do ganho em decibéis (dB)

O ganho é um parâmetro que pode assumir valores da ordem de unidades até centenas de milhares. Assim sendo será conveniente escolher a forma de representação: linear ou decibéis(dB). Para variações dentro de uma faixa de uma ou duas ordens de grandeza costuma-se utilizar a representação linear. Por outro lado, para variações de três ordens de grandezas ou superiores prefere-se utilizar a representação em decibéis. O ganho em decibéis é definido pela expressão a seguir:

$$G_{dB} = 20 \log G$$

A tabela 1 a seguir mostra exemplos de representação de ganho no formato linear e no formato logarítmico.

Tabela 1: Ganho Linear x Ganho em decibéis

G	GdB
0,01	-40
0,05	-26,0
0,01	-40,0
0,8	-1,9
1	0,0
5	14,0
10	20,0
15	23,5
60	35,6
100	40,0
300	49,5
1000	60,0
5000	74,0
20000	86,0

2.3 Impedância de entrada:

Outro parâmetro importante do AmpOp é a sua impedância de entrada, Z_{in} . Na maioria das vezes é suficiente considerarmos apenas a parte resistiva da impedância, ou seja, consideramos que $Z_{in} = R_{in}$. O valor do R_{in} é idealmente infinito, sendo na prática da ordem de vários megohms.

Exemplo 1 – Circuito inversor com AmpOp ideal

Um circuito inversor é aquele em que o ganho 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”.

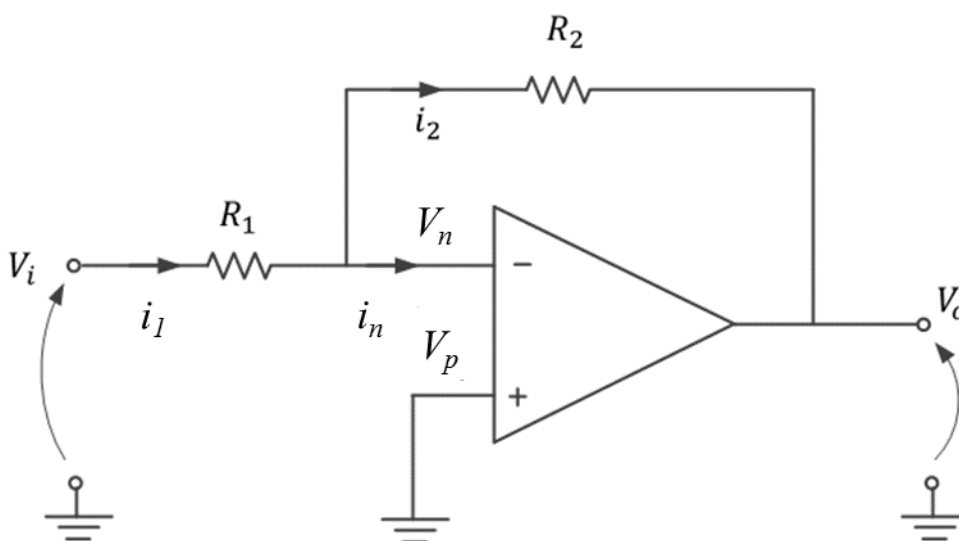


Figura 2 – Circuito inversor utilizando Amplificador Operacional.

Vamos supor que o AmpOp seja ideal, ou seja: $A \rightarrow \infty$ e $R_{in} \rightarrow \infty$.

Como $R_{in} \rightarrow \infty$, a corrente entrando pelo terminal “ V_n ” do AmpOp será nula, ou seja, $i_n = 0$. Logo $i_1 = i_2$.

Por outro lado, como $A \rightarrow \infty$ e assumindo-se que a tensão de saída do AmpOp (V_o) é finita, resulta que $V_p - V_n = 0$, já que $V_o = A(V_p - V_n)$. Como $V_p = 0$ (seu terminal está aterrado), então $V_n = 0$. Observem que a tensão no terminal negativo, V_n , é nula. Dizemos então que temos um “terra virtual” nesse terminal.

Assim, $i_1 = i_2 = \frac{V_i}{R_1} = \frac{-V_o}{R_2}$ e, portanto,

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (2)$$

Ou seja, a tensão de saída é a tensão de entrada multiplicada pelo fator $-\frac{R_2}{R_1}$. Por exemplo, se $R_1 = R_2$ teremos $V_o = -V_i$ (circuito inversor com ganho unitário).

O que acharam da análise que acabamos ver no Exemplo 1? Se achou que ficou confuso, não se preocupe, pois embora cada um dos passos seja simples, foram introduzidos conceitos que não são intuitivo, como por exemplo o “terra virtual”. Vamos apresentar a seguir outro conceito que é o gerador vinculado.

3. MODELO EQUIVALENTE DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O comportamento de um AmpOp pode ser analisado utilizando-se um modelo equivalente para representá-lo. Para tanto, vamos introduzir um novo tipo de dispositivo 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 uma outra tensão e multiplicada por um fator, como mostrado na Figura 3.

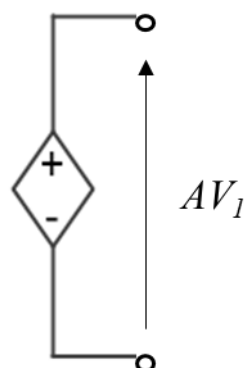


Figura 3 - Gerador Vinculado Controlado por Tensão.

A tensão “ V_1 ” é uma tensão de alguma outra parte do circuito que é escolhida de acordo com o interesse. O “ A ” é um fator de multiplicação do gerador.

Vamos agora representar o AmpOp através do seu modelo equivalente, utilizando um “gerador vinculado controlado por tensão”. A Figura 4, abaixo, mostra as duas formas de se representar um AmpOp.

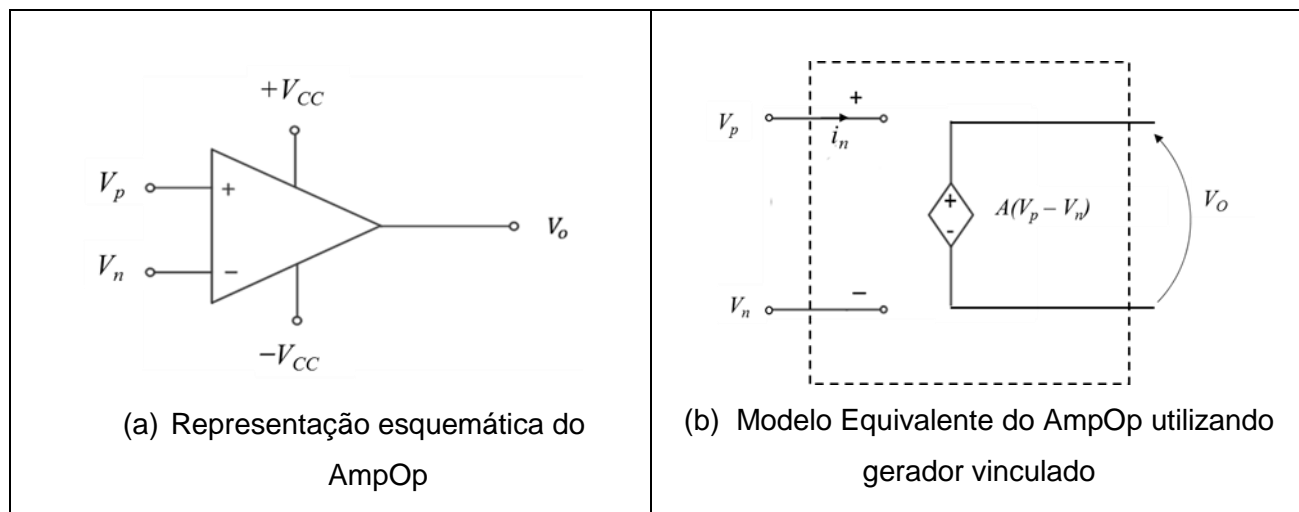


Figura 4 - Representações do AmpOp.

4. CIRCUITO AMPLIFICADOR COM REALIMENTAÇÃO NEGATIVA, CONSIDERANDO-SE GANHO FINITO

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 4. Vamos considerar também que o ganho (A) seja finito.

Neste caso, o gerador de tensão controlado por tensão, que modela o amplificador operacional ideal, gera em sua saída (v_2) uma tensão proporcional à v_1 . Como indicado no item 3, $v_2(t) = A \cdot v_1(t)$, sendo A um fator de amplificação.

A Figura 5, a seguir, apresenta o circuito inversor amplificador com o modelo equivalente do AmpOp. Neste circuito, a entrada positiva do amplificador operacional, v_p , está aterrada, logo $v_p = 0$. Assim, como $v_1 = v_p - v_n$, tem-se que $v_2(t) = A (-v_n)$, ou, de outra forma, $v_n = -v_2/A$.

Sabemos que $i_1 = i_2$, então $\frac{e_s - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_2}{R_2} \rightarrow \frac{e_s + v_2/A}{R_1} = \frac{-v_n/A - v_2}{R_2}$

Resulta que:

$$\frac{v_2}{e_s} = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)} \right) \tag{3}$$

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

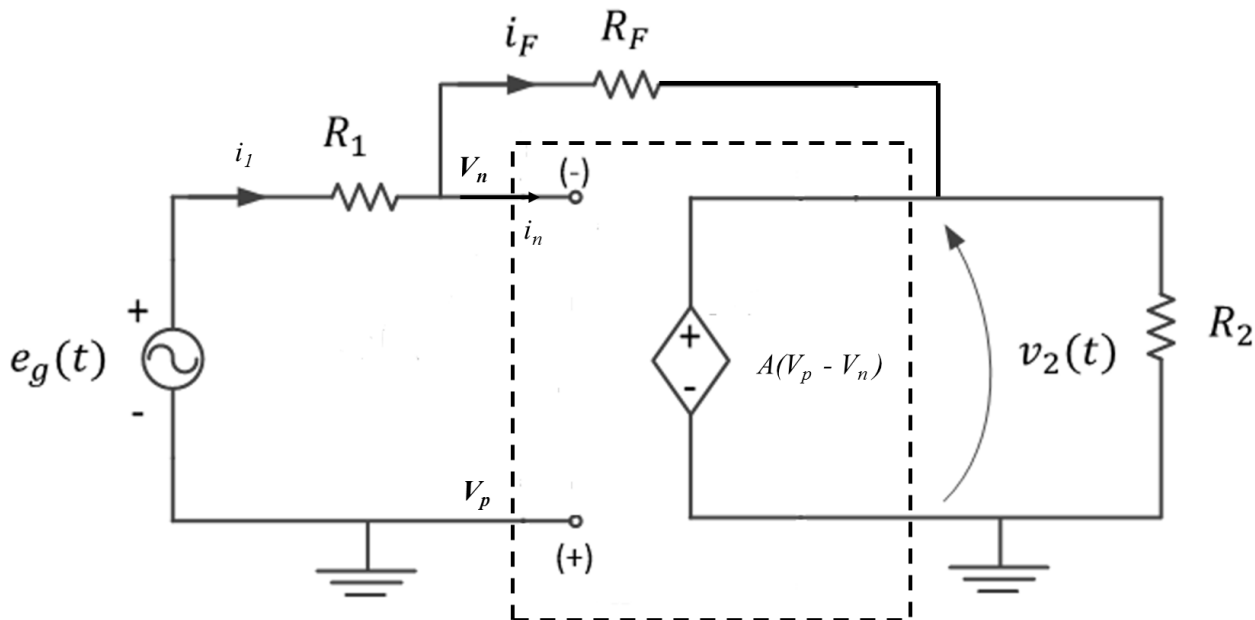


Figura 5 - Circuito inversor com AmpOp representado pelo modelo equivalente.

5. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A respeito de Resposta em Frequência teremos uma experiência específica (Experiência 6) para tratar deste assunto. Entretanto, cabe fazermos uma breve consideração a respeito. Idealmente, a resposta em frequência de um amplificador operacional é tal que o ganho é constante para toda faixa de frequência. Porém, na prática, o ganho será praticamente constante até uma determinada frequência. Para frequências acima de um certo limite o ganho do amplificador será decrescente com o aumento da frequência.

A Figura 6 a seguir mostra um exemplo do comportamento do ganho em malha aberta em função de frequência de um amplificador operacional 741. Observe que o ganho é constante somente para frequências abaixo de 0,1 Hz. Observe também que o ganho decresce a uma taxa constante de aproximadamente 20 decibéis por década (20dB/dec). Ou seja, o ganho diminui 10 vezes quando a frequência aumenta de 10 vezes.

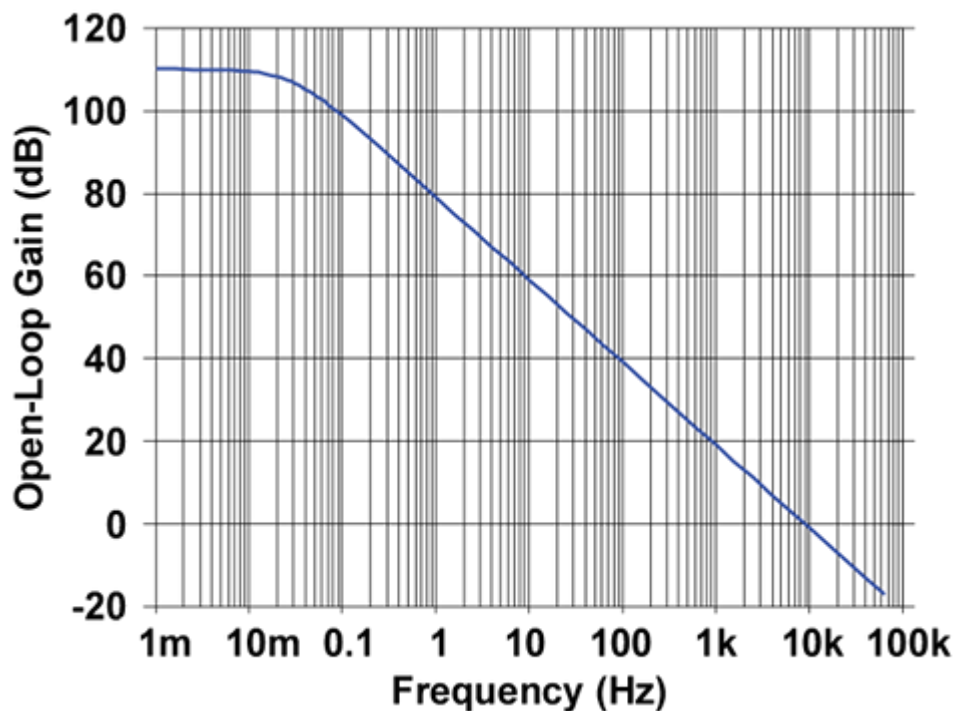


Figura 6 – Exemplo de gráfico de resposta em frequência de um amplificador operacional 741.

6. 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. 7 mostra o circuito interno de um AmpOp 741.

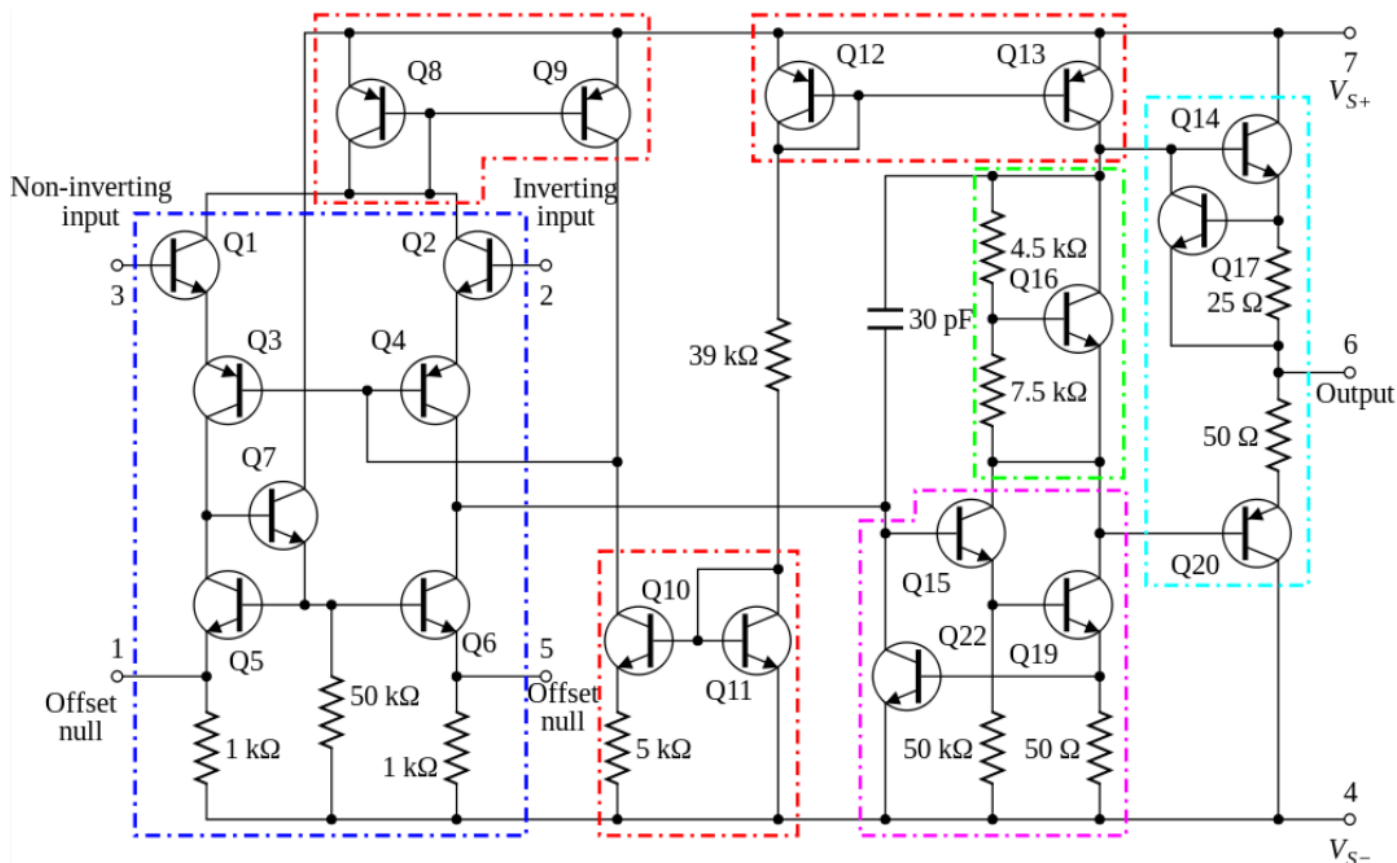


Figura 7 – Diagrama elétrico do AmpOp 741 (Fairchild).

Com relação à Figura 7, observem que para a análise do AmpOp em circuitos elétricos estaremos interessados apenas nos sinais de entrada (v_p e v_n) e da saída do dispositivo (v_s). Por isso substituiremos este complexo circuito eletrônico pelo seu modelo equivalente. Também iremos considerar as suas características intrínsecas, como $Z_{in} \rightarrow \infty$ e $v_p \approx v_n$.