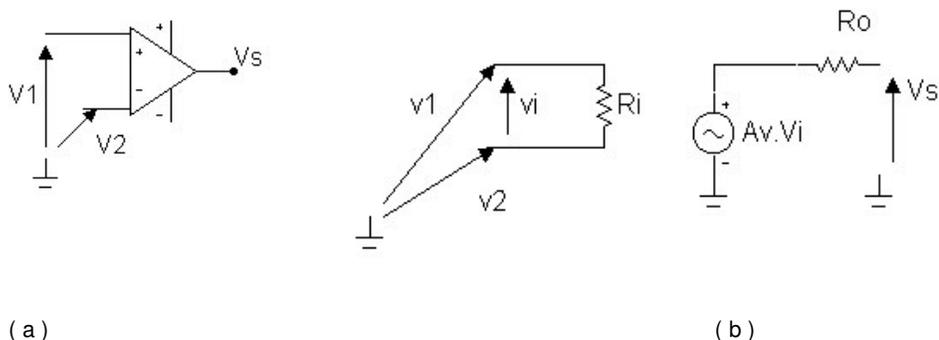


## AMPLIFICADOR OPERACIONAL

### 1.Introdução

O amplificador operacional (AO) é um dispositivo em circuito integrado (CI) que tem grande aplicações em todas as áreas da eletrônica. Como o circuito interno é muito complexo toda a análise será feita considerando o modelo a ser visto a seguir na Figura 1, o qual é adequado para a maioria das aplicações. A Figura 1a mostra o símbolo do AO e a Figura 1b o circuito equivalente simplificado.



**Figura1: Amplificador operacional – Símbolo e circuito equivalente**

Na Figura 1  $v_1$  é a tensão aplicada na entrada não inversora e  $v_2$  a tensão aplicada na entrada inversora.

$V_i = v_1 - v_2$  é o sinal erro ou sinal diferença

$R_i$  é a resistência de entrada

$R_o$  é a resistência de saída

$A_v$  é o ganho de tensão em malha aberta (ganho sem realimentação)

Sem nenhuma carga ligada na saída,  $V_s = A_v V_i = A_v (v_1 - v_2)$ , isto é, o AO pode ser considerado basicamente como um amplificador diferencial, pois a saída responde somente à diferença entre as duas tensões de entrada, se  $v_1 = v_2$   $v_s = 0$ .

Um AO idealmente deveria ter as seguintes características:

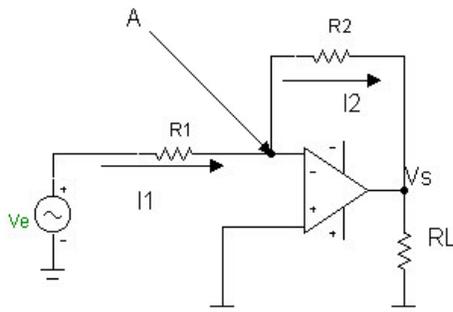
- Resistência de entrada infinita
- Resistência de saída nula
- Ganho de tensão em malha aberta infinito
- Largura de faixa infinito
- Ausência de offset na saída ( $V_s = 0$  se  $v_1 = v_2$ )
- Slew rate infinito

### 2 – Circuitos Básicos

Os circuitos que serão vistos a seguir são considerados básicos, pois derivam a maioria dos circuitos que serão vistos em seguida.

#### 2.1. – Amplificador Inversor

É um circuito com realimentação negativa (a saída se conecta com a entrada inversora através de um circuito), obtida através da rede de resistores  $R_2$  e  $R_1$ .



**Figura2: Amplificador inversor**

Para obter a expressão do ganho com realimentação ( $A_{Vf} = V_S/V_e$ ) faremos algumas considerações

1. Vamos admitir que o ganho de malha aberta é infinito, isto é,  $A_V = V_S/V_i = \text{infinito}$ , logo  $V_i = V_S/A_V = 0$  isto é, o ponto A tem o mesmo potencial do terra (dizemos que o ponto A é um terra virtual).

2. Também consideraremos que  $R_i$  é infinito e em consequência  $I_1 = I_2$  (a corrente nas entradas do AO são nulas)

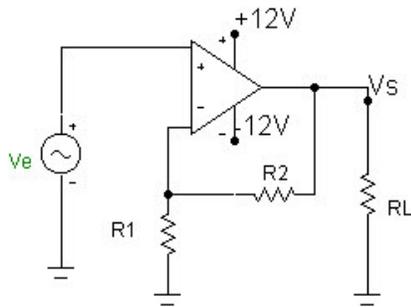
Feitas as considerações acima da Figura 2 obtemos :

$$V_e = R_1 \cdot I_1 \quad \text{e} \quad V_S = -R_2 \cdot I_2 \quad \text{portanto} \quad A_{Vf} = V_S/V_e = -R_2 \cdot I_2 / R_1 \cdot I_1 \quad \text{e como} \quad I_1 = I_2 \Rightarrow \boxed{A_{Vf} = -R_2/R_1}$$

O sinal negativo indica defasagem de  $180^\circ$  entre  $V_e$  e  $V_S$  do circuito. A resistência de entrada do circuito é dada por  $R_{if} = R_1$  (é a resistência efetivamente "vista" pela fonte  $V_e$ ).

## 2.2 – Amplificador Não Inversor

É o circuito da Figura 3, no qual podemos observar que a realimentação continua ser negativa, mas o sinal a ser amplificado é aplicado na entrada não inversora.



**Figura 3: Amplificador não inversor**

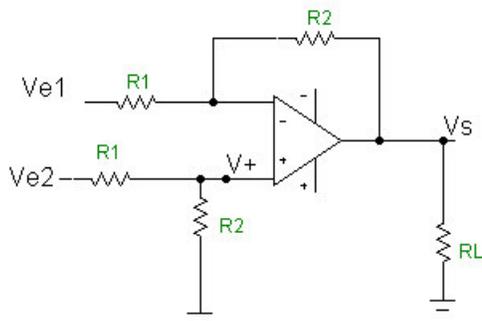
As mesmas considerações feitas para o amplificador inversor ( $R_i = \text{infinita}$  e  $A_V = \text{infinito}$ ) também serão feitas para a obtenção do ganho com realimentação ( $A_{Vf} = V_S/V_e$ ), logo podemos escrever :

$$V_e = R_1 \cdot I_1 \quad \text{e} \quad V_S = (R_1 + R_2) \cdot I_1 \quad \text{o ganho com realimentação será dado por :}$$

$$A_{Vf} = V_S/V_e = (R_1 + R_2) \cdot I_1 / R_1 \cdot I_1 = (R_1 + R_2) / R_1 \quad \text{ou} \quad \boxed{A_{Vf} = 1 + R_2/R_1}$$

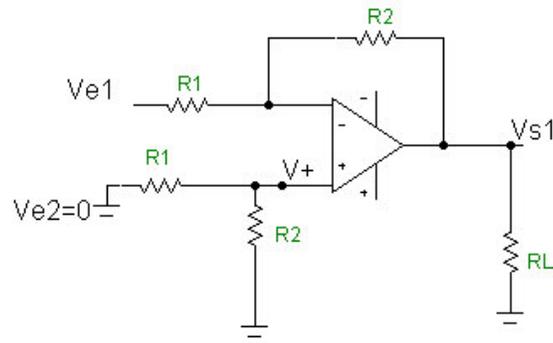
## 2.3 – Amplificador Subtrator – Amplificador Diferencial

O amplificador subtrator é uma combinação do amplificador inversor com o não-inversor, Figura 4.



**Figura 4: Amplificador subtrator (Diferencial)**

Para entendermos, usamos o teorema da superposição de efeitos para obter a expressão de  $V_S = f(v_{e1}, v_{e2})$ . Primeiramente anulamos  $v_{e2}$  e determinamos  $V_S$  em função de  $v_{e1}$  resulta o circuito da Figura 5.

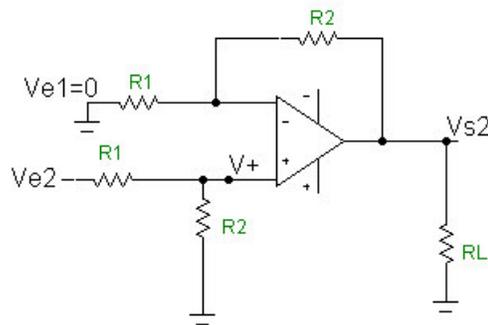


**Figura 5: Amplificador subtrator com  $v_2 = 0$**

Podemos observar que o circuito resultante é o amplificador inversor já visto, desta forma

$$V_{s1} = -R_2/R_1 \cdot v_{e1}$$

Agora, anulando  $v_{e1}$  obtemos o circuito da Figura 6.



**Figura 6: Amplificador subtrator com  $v_{e1}=0$ .**

O circuito resultante é o amplificador não-inversor com um divisor de tensão na entrada, desta forma :  
 $V_{s2} = \text{Ganho} \cdot V_+$      $\text{Ganho} = A_{vf} = (R_1 + R_2)/R_1$     e  $V_+ = R_2/(R_1 + R_2) \cdot v_{e2}$     portanto:

$$V_{s2} = (R_1 + R_2)/R_1 \cdot R_2/(R_1 + R_2) v_2 = R_2/R_1 \cdot v_{e2}$$

A saída  $V_S$  no circuito da Figura 6 é obtida somando as saídas parciais  $V_{s1}$  e  $V_{s2}$ , isto é :

$$V_S = V_{s1} + V_{s2} = -R_2/R_1 \cdot v_{e1} + R_2/R_1 \cdot v_{e2} = R_2/R_1 \cdot (v_{e2} - v_{e1})$$

$$V_S = R_2/R_1 \cdot (v_{e2} - v_{e1})$$

O circuito é um amplificador diferencial pois amplifica só a diferença entre duas tensões. Se  $v_1 = v_2$  a saída será nula. O ganho diferencial é dado por :

$$A_d = R_2/R_1.$$

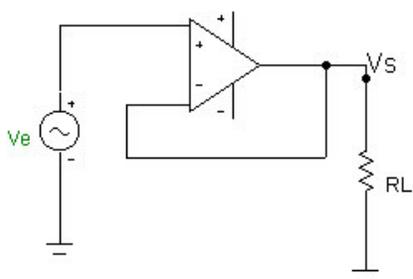
Se  $R_1 = R_2$

$$V_S = v_{e2} - v_{e1}$$

Neste caso o circuito realiza a diferença entre duas tensões, daí o nome de subtrator.

## 2.4 - Buffer

Um circuito derivado do amplificador não inversor é o buffer ou seguidor de tensão o qual é obtido a partir da Figura 3 fazendo-se  $R_1 = \text{infinito}$  (circuito aberto) e  $R_2 = 0$  (curto circuito) resultando o circuito da Figura 7.



**Figura 7: Seguidor de tensão (buffer)**

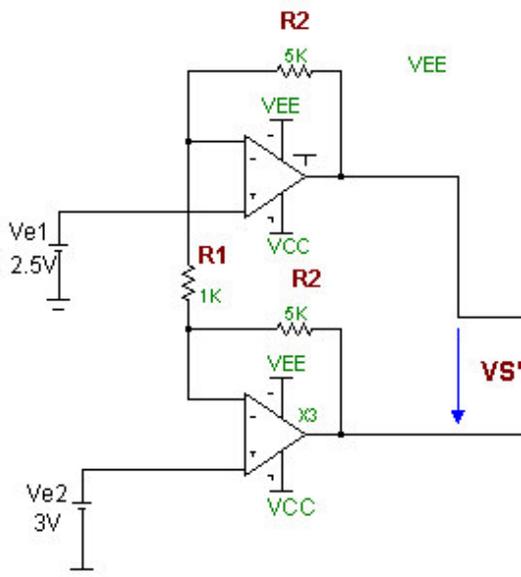
Este circuito é caracterizado por ter ganho de tensão igual a 1, altíssima resistência de entrada e baixíssima resistência de saída, sendo calculadas respectivamente por:

$$R_{if} = R_i \cdot A_v \quad \text{e} \quad R_{of} = R_o / A_v \quad \boxed{A_v = 1}$$

A principal aplicação de um circuito buffer é isolar um circuito que tem alta resistência de saída de uma carga de baixo valor.

### 2.5. Amplificador Diferencial de Instrumentação

O amplificador diferencial da Figura 4 tem como principal desvantagem o fato da resistência de entrada ser dada por  $R_1$ , o qual por sua vez não pode ser muito alta, pois isso implicaria num valor de  $R_2$  muito alto. Já que o ganho é dado por  $R_2/R_1$ , por exemplo, se for necessário um ganho de 1000 e  $R_1$  da ordem de  $1M\Omega$ , o valor de  $R_2$  teria de ter um valor proibitivo da ordem de  $1G\Omega$ . Outro problema é a dificuldade para se variar o ganho, já que para isso duas resistências iguais ( $R_2$  ou  $R_1$ ) deveriam ser variadas ao mesmo tempo. Uma solução seria o uso de um potenciômetro duplo comandado por um único eixo. Uma solução mais simples é o circuito da Figura 8, que além de ter uma altíssima resistência de entrada permite que o ganho seja mudado variando só  $R_1$ .



**Figura 8: Amplificador diferencial de instrumentação**

No circuito da Figura 8 o ganho é calculado por :

$$A_v = V_S' / V_e = 1 + 2 \cdot R_2 / R_1$$

Onde  $V_e = V_{e2} - V_{e1}$

Caso seja necessário ligar uma carga com um dos terminais aterrados, o circuito da Figura 9 pode ser usado.

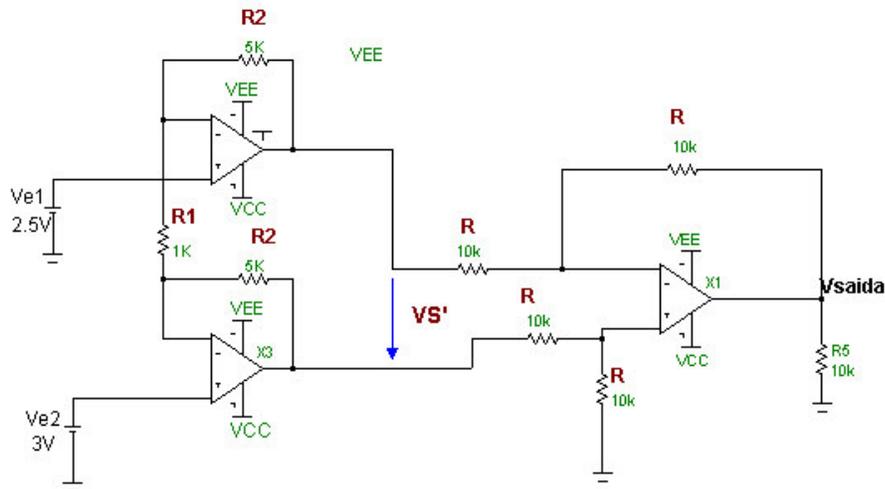
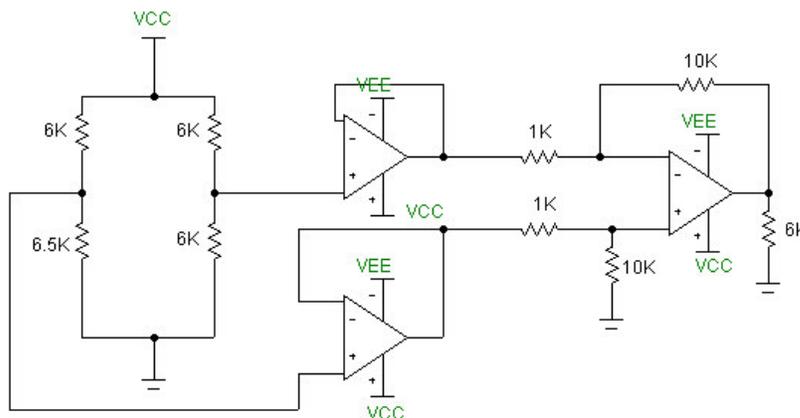


Figura 9: Amplificador diferencial de instrumentação com carga aterrada.

Com relação ao circuito da Figura 9  $V_S' = V_B - V_A = V_2 - V_1$

**Exemplos**

1- Calcular  $V_S$  em cada caso. ( $V_{cc}=12V$ )

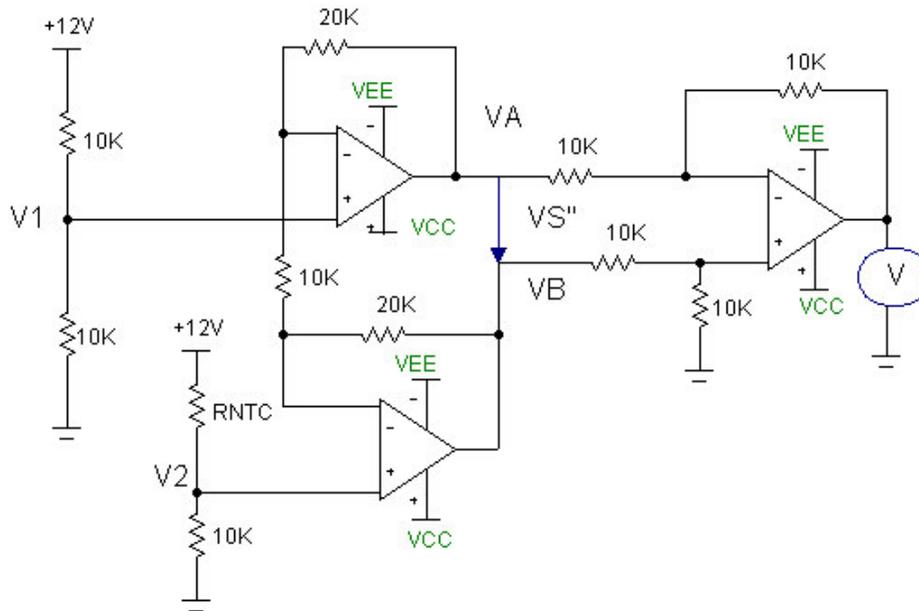


**Solução:**

No circuito o AO1 e o AO2 são Buffers logo  $V_A = V_2$  e  $V_B = V_1$

$$e \quad V_2 = \frac{6K \cdot 12V}{6K5 + 6K} = 6V \quad V_1 = \frac{6K5 \cdot 12V}{6K5 + 6K} = 6,24V \quad V_S = 10 \cdot (V_B - V_A) = 10 \cdot (6,24 - 6) = 2,4V$$

2- No circuito o NTC (Negative Coefficient Temperature) tem uma resistência de 10K a 25°C e 5K a 50°C. Quais os valores de tensão indicados pelo voltímetro colocado na saída que correspondem à essas temperaturas?



**Solução:**

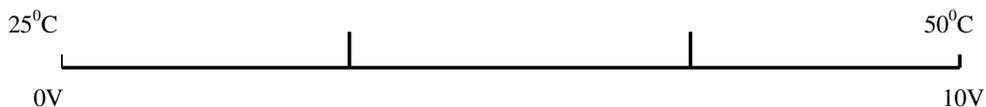
$$V_{S'} = V_B - V_A \quad \text{Para } 25^\circ\text{C} \quad R_{NTC} = 10K \quad \text{logo} \quad V_2 = 6V \left( \frac{10K \cdot 12V}{10K + 10K} \right) \text{ e como } V_1 = 6V$$

$$V_e = V_2 - V_1 = 0V \quad \text{e portanto} \quad V_{S'} = 0V \quad \text{e também } V_S = 0$$

$$\text{Para } 50^\circ\text{C} \quad R_{NTC} = 5K \quad \text{logo} \quad V_2 = \frac{10K \cdot 12V}{5K + 10K} = 8V$$

$$V_e = V_2 - V_1 = 8 - 6 = 2V \quad V_{S'} = A_v \cdot V_e = \left( 1 + 2 \cdot \frac{20K}{10K} \right) \cdot 2 = 10V$$

Como  $V_S = V_{S'} = 10V$  resulta a escala



3 – Exemplo de Amplificador para termopar

$$\text{se } R_2 = R_3 \text{ e } R_1 = R_4, \text{ então o ganho pode ser determinado por } A = \frac{R_2}{R_1}$$

$$C = 100nF$$

