

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.

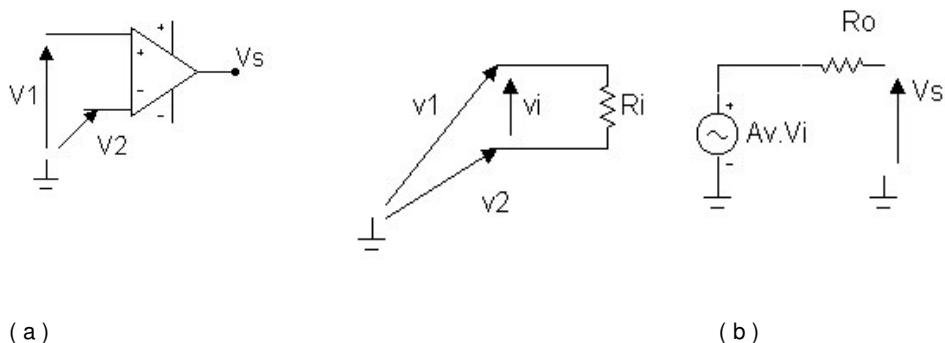


Figura1: Amplificador operacional – Símbolo e circuito equivalente

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 .

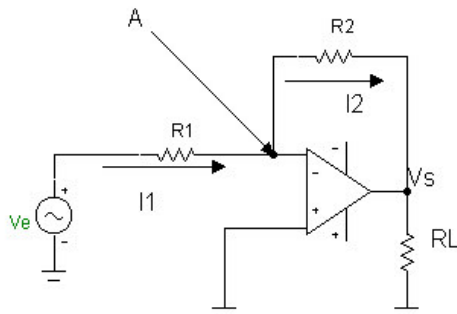


Figura2: Amplificador inversor

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° 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.

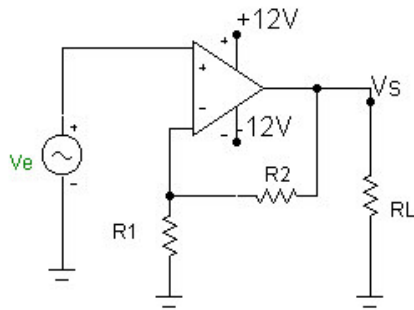


Figura 3: Amplificador não inversor

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.

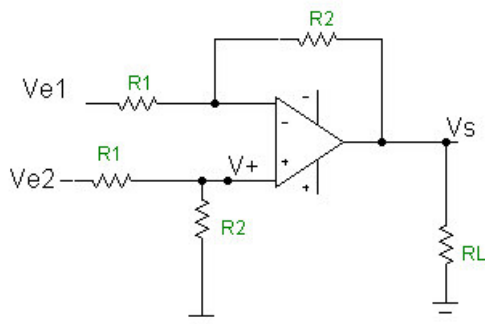


Figura 4: Amplificador subtrator (Diferencial)

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.

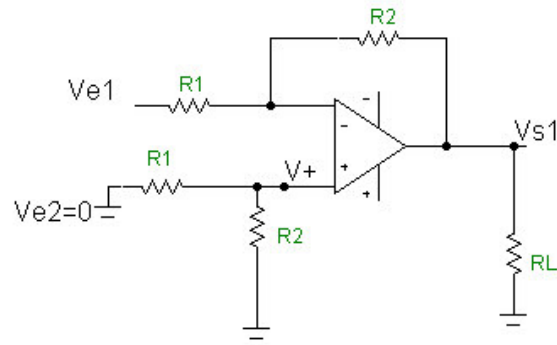


Figura 5: Amplificador subtrator com $v_2 = 0$

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.

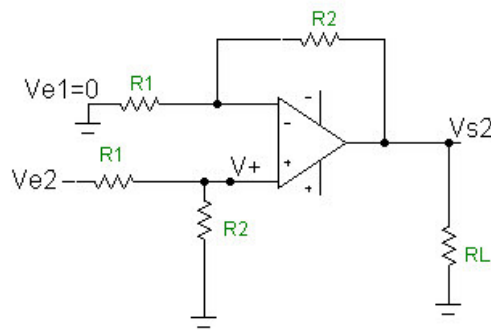


Figura 6: Amplificador subtrator com $v_{e1}=0$.

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 $R_1 = \infty$ (circuito aberto) e $R_2 = 0$ (curto circuito) resultando o circuito da Figura 7.

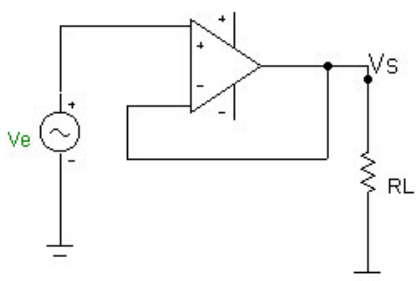


Figura 7: Seguidor de tensão (buffer)

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 .

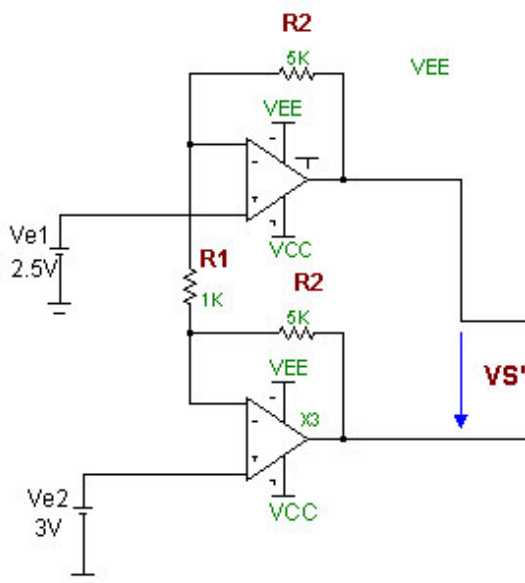


Figura 8: Amplificador diferencial de instrumentação

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.

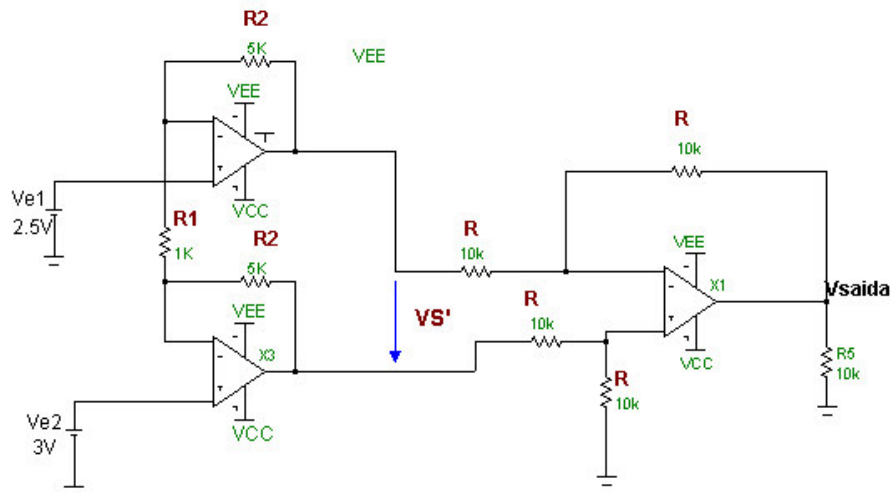
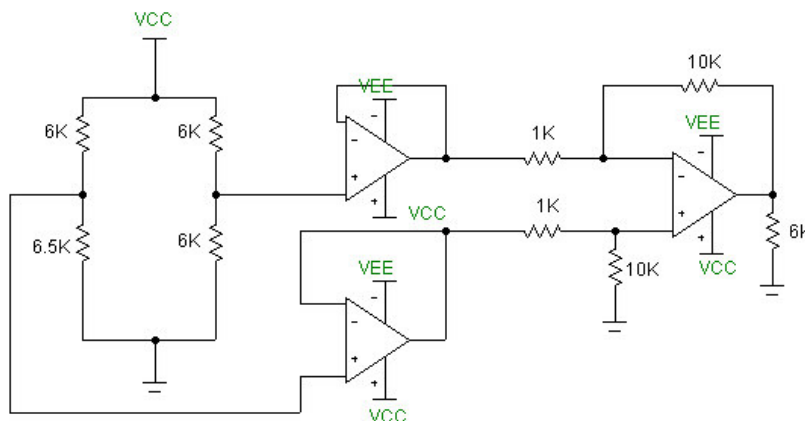


Figura 9: Amplificador diferencial de instrumentação com carga aterrada.

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. ($V_{cc}=12V$)

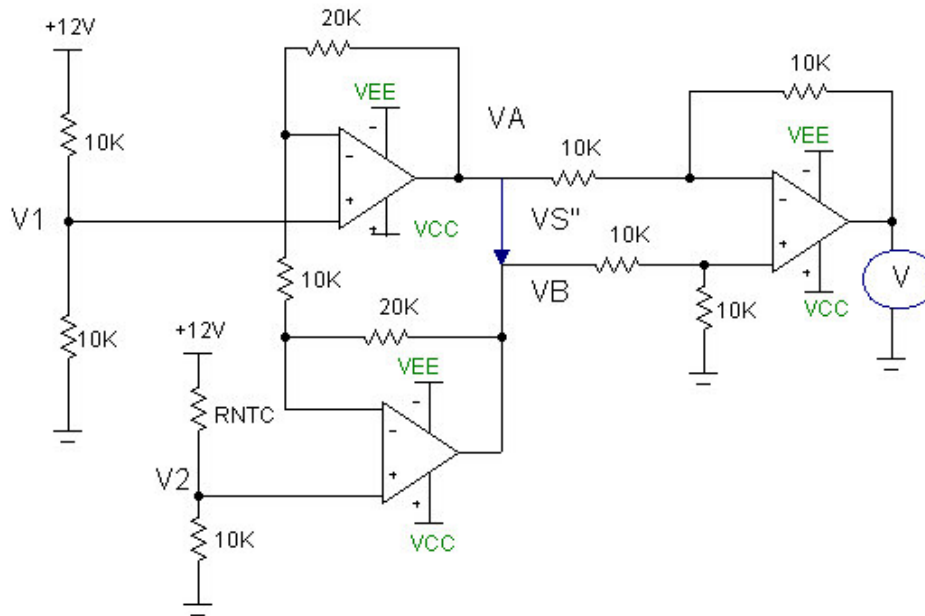


Solução:

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 (**N**egative **C**oefficient **T**emperature) 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:

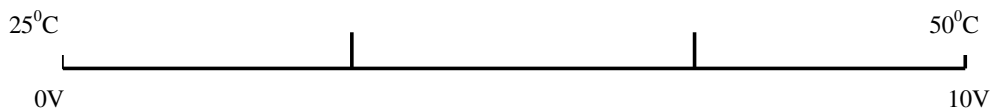
$$V_{S'} = V_B - V_A \quad \text{Para } 25^{\circ}\text{C} \quad R_{NTC} = 10K \quad \text{logo} \quad V_2 = 6V \left(\frac{10K \cdot 12V}{10K + 10K} \right) \text{ e como } V_1 = 6V$$

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

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

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

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



3 – Exemplo de Amplificador para termopar

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

$C = 100nF$

