AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Historicamente, o Amplificador Operacional foi concebido para realizar operações matemáticas a partir da interpretação de tensões analógicas, com as quais era possível realizar operações de adição, subtração, integração e diferenciação, entre outras. Exatamente por realizar operações, recebeu esse nome. Os primeiros AmpOps eram feitos a válvulas termiônicas, assim como os primeiros transistores, e usados em computadores analógicos. Muito diferentes, os AmpOps modernos, que são construídos em circuitos integrados e compostos de dezenas de transistores de silício ou germânio, possuem parâmetros próprios relacionados ao encapsulamento, com uso muito diverso e versátil na Eletrônica.

Basicamente, podemos usar um AmpOp para projetar circuitos amplificadores de sinais, como sinais de áudio, ou osciladores, comparadores, integradores, diferenciadores, somadores, acionadores etc. Nesta leitura, vamos entender um pouco como equacionar AmpOps a partir de seu modelo simplificado. Talvez o mais famoso dos AmpOps seja o Circuito Integrado 741, ilustrado na Figura 1.

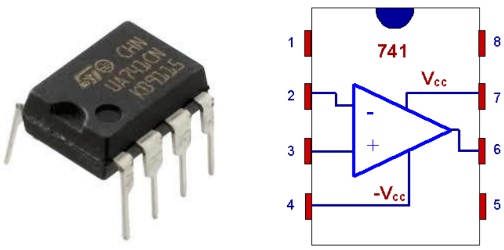


Figura 1: Amplificador Operacional 741.

1 O MODELO DO AMPOP

O circuito elétrico de um AmpOp é bastante complexo, composto de transistores, resistores e capacitores, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Contudo, por meio de teoremas de equivalência de circuitos, podemos reduzi-lo sem prejuízos ao circuito equivalente da Figura 3, composto de um resistor de entrada Ri, de uma fonte de tensão controlada, e de um resistor de saída Ro.

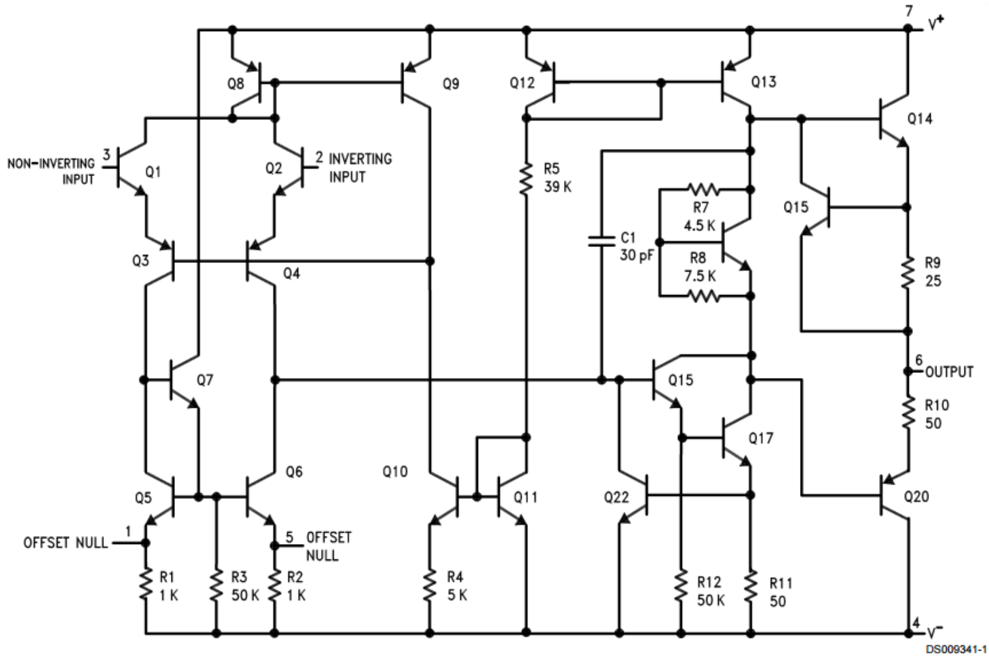


Figura 2: Amplificador Operacional 741 "por dentro".

A tensão controlada pode ser um tanto complexa de ser entendida do ponto de vista prático, porém, no circuito da Figura 3, ela deve ser compreendida como um componente ativo que fornece tensão com valor dependente da tensão no resistor Ri. Ou seja, a tensão fornecida pela fonte controlada (o losango na Figura 3) será igual a $A \cdot Vd$, sendo Vd a tensão no resistor Ri e A o ganho, ou fator multiplicativo.

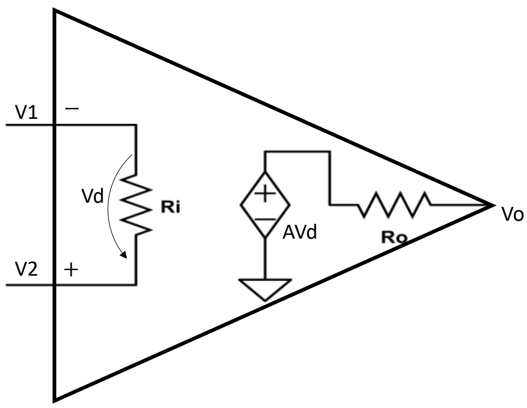


Figura 3: Modelo elétrico equivalente do AmpOp.

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros dos componentes que compõem o circuito equivalente do AmpOp. Note que os valores de Ri e A são muito grandes, enquanto o valor de Ro é pequeno. O AmpOp ideal é um conceito abstrato e, portanto, irreal, mas nos permite equacionar mais facilmente as várias configurações do AmpOp, como veremos.

Tabela 1 – Parâmetros de AmpOps reais e ideal

	LM741	OP177	Ideal
A	$2 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^6$	∞
Ri	$2M\Omega$	$45M\Omega$	∞
Ro	100Ω	60Ω	0
VCC	$\pm 18V$	$\pm 13V$	?

Um AmpOp ideal não precisa de alimentação externa exatamente porque ele não existe! No mundo real, para que o AmpOp funcione, precisamos alimentá-lo com tensão proveniente de uma fonte DC. Geralmente, o AmpOp é alimentado com uma tensão positiva e uma negativa ($\pm Vcc$), mas também há circuitos nos quais a alimentação negativa é igual a zero. Ao observar o circuito real da Figura 2, note que, sem uma fonte de tensão externa, não haverá tensões e correntes nos transistores, resistores e capacitores, e por isso não haverá nenhuma tensão na saída do AmpOp.

Contudo, ao alimentar o AmpOp com fontes de tensão DC ($\pm Vcc$), teremos uma tensão na saída que é proporcional à tensão no resistor Ri, igual a $V2 - V1$, menos a queda de tensão no resistor de saída Ro. Ou seja, ao usar a segunda lei de Kirchhoff na malha da fonte controlada, redesenhada na Figura 4, teremos:

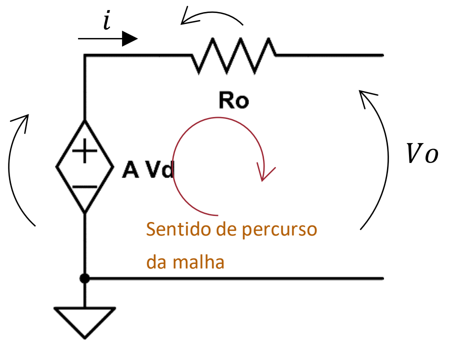


Figura 4: Malha do circuito de saída do modelo do AmpOp.

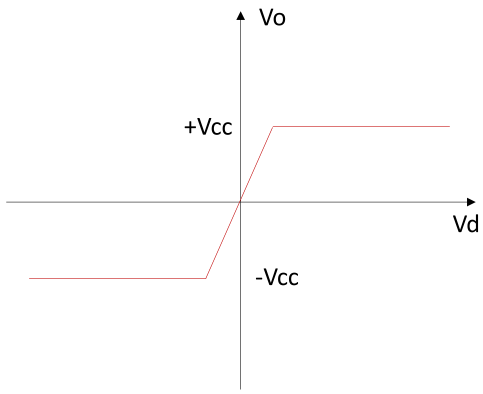
$A \cdot Vd - Ro \cdot i - Vo = 0$

Ou seja,

$Vo = A \cdot Vd - Ro \cdot i$

Sendo a corrente i a fornecida na saída do AmpOp.

Conforme a Tabela 1, sabemos que o ganho A é muito alto ao passo que o resistor de saída Ro é muito baixo, o que resultará em um valor de tensão também muito alto em Vo, dependendo do valor de Vd. Aqui teremos que lembrar que a tensão elétrica está relacionada com a quantidade de energia necessária para mover cargas elétricas, e que, pela lei da conservação de energia, não poderemos ter valores de tensão na saída do AmpOp maiores do que as tensões fornecidas pelas fontes de tensão positiva e negativa. Assim, na Figura 5 podemos entender que há uma região com valores muito pequenos de Vd onde há linearidade na relação entre Vo e Vd. Contudo, para valores de Vd grandes, em módulo, a tensão de saída estará saturada ao máximo valor possível de tensão, igual a $+Vcc$ ou $-Vcc$.



Restrição: $-\mathrm{Vcc} \leq Vo \leq +Vcc$

Figura 5: Restrição física da tensão de saída Vo, que é limitada a $\pm Vcc$.

2 APLICAÇÃO

Como já dissemos, o AmpOp tem várias aplicações em eletrônica, mas as principais são: amplificador inversor, amplificador não inversor, amplificador somador, amplificador diferencial, integrador, diferenciador, oscilados astável e, talvez a mais simples de todas, seu uso como comparador. Vamos a algumas delas!

2.1 AMPLIFICADOR INVERSOR

Para que você entenda como equacionar um circuito com AmpOp e descobrir suas propriedades, vamos iniciar com o exemplo a seguir, que se trata de um amplificador inversor, cujo circuito é ilustrado na Figura 6.

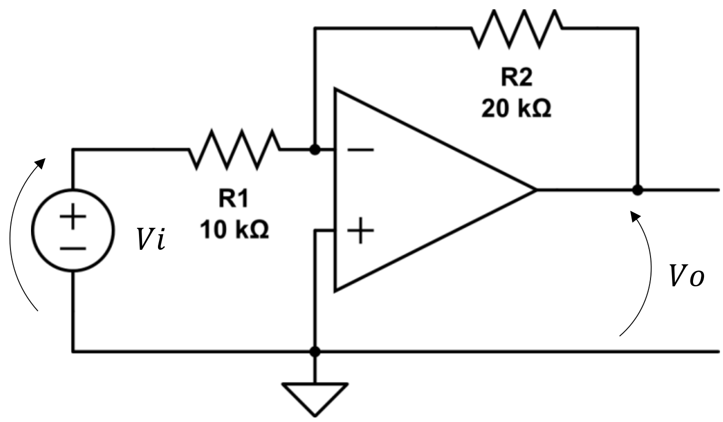


Figura 6: Exemplo de configuração de um Amplificador Inversor.

Nesse circuito você encontrará dois resistores, uma fonte de tensão alternada (Vi) e, claro, um Amplificador Operacional. O triângulo conectado à entrada não inversora representa a conexão ao fio terra (no qual o potencial é nulo). Embora não esteja representado no circuito da Figura 6, o AmpOp está alimentado por fontes de corrente contínua externas, como por exemplo $\pm 12V$, o que não interferirá, como você verá, no equacionamento elétrico do circuito. Pois bem, como já apresentamos o modelo do AmpOp no item 1 (Figura 3), podemos trocar sua representação pelo modelo elétrico de um Amplificador Operacional 741, e chegaríamos no circuito da Figura 7. Tente rabiscar você mesmo como “encaixar” o modelo da Figura 3 no circuito da Figura 6.

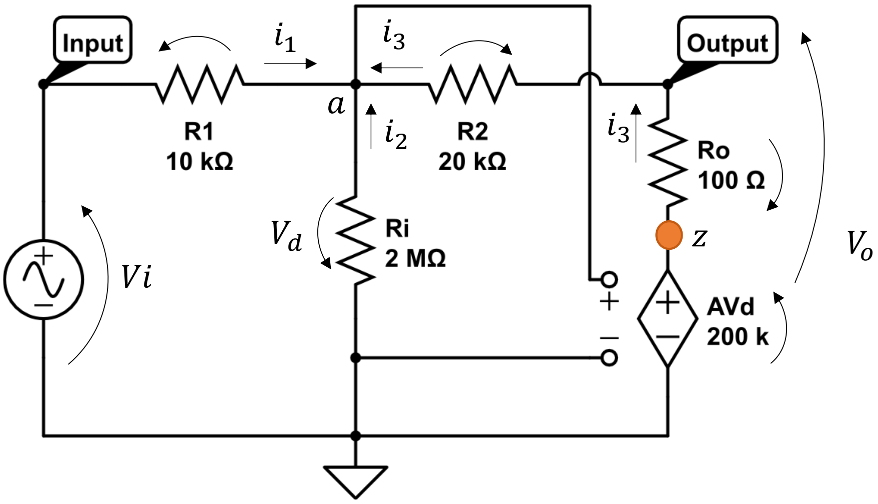


Figura 7: Amplificador não inversor representado pelo modelo elétrico do AmpOp.

Note que adotamos como tensão de entrada ($V_i - \mathrm{Input}$) a tensão entre a fonte AC e o terra, e como tensão de saída ($Vo - \mathrm{Output}$) a tensão entre a saída do AmpOp e o terra. Ou seja, no circuito da Figura 7, os potenciais nos nós $Input$ e $Output$ correspondem às tensões Vi e Vo, pois são tomadas em relação ao referencial nula (terra do circuito).

Pois bem, aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes no nó $Input$, teremos:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Lembrando da Lei de Ohm e que $V_{AB} = V_A - V_B$ para quaisquer pontos A e B, podemos reescrever a equação acima da seguinte forma:

$$\frac{V_i - V_a}{R1} + \frac{0 - V_a}{Ri} + \frac{V_o - V_a}{R2} = 0$$

O que resultará em

$$\frac{V_i - V_a}{R1} = \frac{V_a}{Ri} + \frac{V_a - V_o}{R2}$$

Já a Lei de Kirchhoff das correntes aplicada ao nó $Output$ nos dará a seguinte equação:

$$i_3 = i_3$$

Observando que tensão na fonte controlada é a tensão no ponto Z menos a tensão do Terra, $(V_Z - 0) = AVd$, então $V_Z = AVd$. Usando a Lei de Ohm para calcular a corrente i_3 antes e depois do nó $Output$, chegamos em:

$$\frac{V_o - V_a}{R2} = \frac{AVd - V_o}{R_0}$$

Desenvolvendo a equação obtida pela Lei de Kirchhoff no nó $Input$, teremos:

$$\frac{V_i - V_a}{10 \cdot 10^3} = \frac{V_a}{2 \cdot 10^6} + \frac{V_a - V_o}{20 \cdot 10^3}$$

Multiplicando ambos os lados da equação por $2 \cdot 10^6$, temos:

$$200(V_i - V_a) = V_a + 100(V_a - V_o)$$

$$200V_i = 301V_a - 100V_o$$

Ou seja:

$$V_a \cong \frac{2V_i + V_o}{3} \qquad (1)$$

Voltando à equação da Lei de Kirchhoff aplicada ao nó $Output$, multiplicando-a por -1 e observando que $Vd = -Va$, teremos:

$$\frac{V_a - V_o}{20 \cdot 10^3} = \frac{V_0 + 2 \cdot 10^5 V_a}{100}$$

Multiplicando ambos os lados por 100, temos:

$$\frac{V_a - V_o}{200} = V_o + 2 \cdot 10^5 \cdot \ V_a$$

E substituindo V_a pela equação (1), temos:

$$\frac{2V_i + V_o}{3} - V_o = 200V_o + 4 \cdot 10^7 \cdot \frac{2V_i + V_o}{3}$$

Desenvolvendo algebricamente, chegaremos em:

$$2V_i - 8 \cdot 10^7 V_i = 4 \cdot 10^7 Vo + 600Vo + 2Vo$$

E isolando a razão V_o sobre V_i, teremos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 - 8 \cdot 10^7}{4 \cdot 10^7 + 600 + 2} \cong -2$$

Ou seja, acabamos de determinar, pela simples aplicação das leis de Kirchhoff, embora com uma álgebra trabalhosa, que o ganho do circuito Amplificador Inversor é aproximadamente -2. Aqui o conceito de ganho é bastante simples: trata-se da relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada do circuito. Neste caso, se a tensão de entrada for 1V, a tensão de saída será -2V, invertida e amplificada pelo fator -2.

Vamos agora resolver o mesmo problema utilizando o modelo do AmpOp ideal, ou seja, aquele em que a resistência de entrada e o ganho são infinitos e a resistência de saída é nula. Para isso, considere a Figura 8.

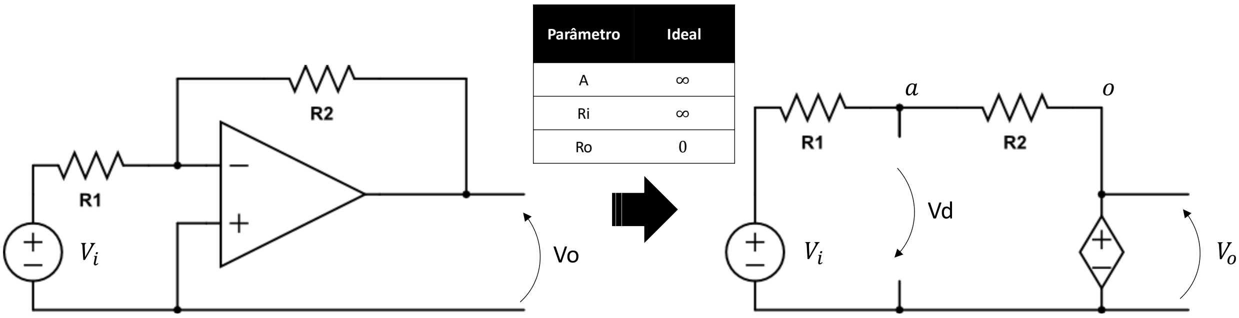


Figura 8: Modelo ideal do Amplificador Operacional na configuração amplificador inversor.

Aplicando a Lei de Kirchhoff no nó a, de maneira análoga ao que fizemos no circuito anterior, teremos que a corrente que entra no nó i é igual à que sai dele. Sem precisar desenhar essas correntes novamente, chegamos em:

$$\frac{V_i - V_a}{R1} = \frac{V_a - Vo}{R2}$$

Desenvolvendo algebricamente, teremos:

$$R1V_a - R1V_o = R2V_i - R2V_a$$

$$V_a(R1 + R2) = R2V_i + R1V_o$$

Mas, como $V_o = A \cdot Vd$ e $V_a = -Vd$, teremos:

$$Vo = A \cdot (-V_a) \;\therefore V_a = \frac{-Vo}{A} \to 0$$

Ou seja, como o ganho A é infinito, a tenão V_a tende a zero. Como o nó a não está ligado diretamente à terra, denomina-se esse nó de "terra virtual", pois seu potencial elétrico é muito próximo de zero.

Assim, considerando que $V_a = 0$, teremos:

$$R1V_o = -R2V_i$$

O que resulta em:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R2}{R1}$$

Ou seja, se utilizarmos o modelo ideal do AmpOp para determinar o ganho do circuito da Figura 6, chegaremos, de forma mais fácil, ao ganho de -2. Esta é a clássica equação do ganho de um Amplificador Inversor, e daqui em diante vamos usar o modelo do AmpOp ideal para determinar a tensão de saída em função da tensão de entrada!

2.2 AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR

O circuito do amplificador não inversor é apresentado na Figura 9. Para deduzirmos a relação entre a tensão de saída (Vo) e a tensão de entrada (Vi), vamos usar o modelo elétrico do AmpOp ideal. Contudo, ao invés de substituirmos o símbolo do AmpOp por seu circuito modelo, tentaremos aplicar a Lei de Kirchhoff das correntes no próprio circuito da Figura 9.

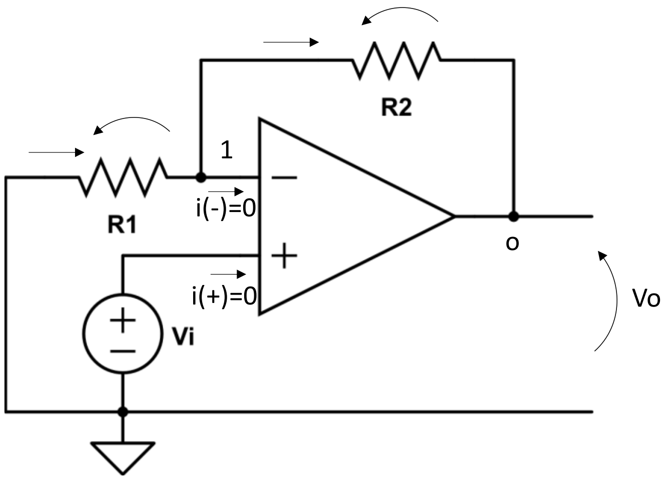


Figura 9: Circuito do amplificador não inversor.

Nomeando o nó conectado à entrada inversora como nó 1 e aplicando nela a Lei de Kirchhoff das correntes, teremos:

$$\frac{0 - V1}{R1} = \frac{\mathrm{V1} - \mathrm{Vo}}{\mathrm{R2}}$$

Veja que, como a resistência de entrada Ri do modelo do AmpOp (Figura 3) é muito grande (infinita no caso ideal), não haverá corrente elétrica entrando nas entradas inversora e não inversora do AmpOp. A equação acima, como você deve ter percebido, descreve a igualdade entre as correntes em $R1$ e em $R2$.

Desenvolvendo algebricamente, teremos:

$$R2V1 = -V1R1 + VoR1$$

$$VoR1 = V1(R2 + R1)$$

Mas, como $Vd = Vi - V1$ (lembre-se do modelo da Figura 3) e $Vd = 0$ (pois $Ri \to \infty$ e não há corrente circulando por esse resistor), teremos:

$$V1 = Vi$$

O que resultará em:

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{R2 + R1}{R1}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{R2}{R1} + 1$$

Ou seja, o ganho de um amplificador não inversor é a razão entre o resistor de feedback ($R2$) e o resistor de entrada ($R1$), mais um. Para o caso de $R1 = 200\Omega$ e $R2 = 100\Omega$, o ganho do AmpOp na configuração não inversor seria de $+3$!

2.3 AMPLIFICADOR SOMADOR

A Figura 10 apresenta a configuração elétrica de um amplificador somador.

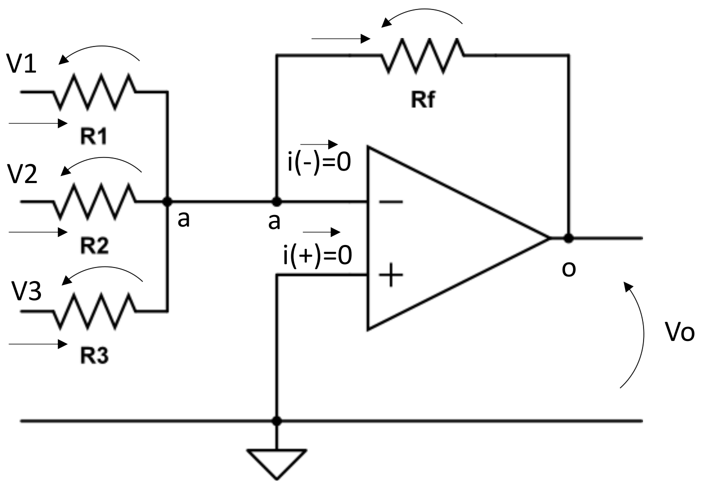


Figura 10: Circuito do amplificador somador.

Da mesma maneira, aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes no nó a, teremos:

$$\frac{V1 - Va}{R1} + \frac{V2 - Va}{R2} + \frac{V3 - Va}{R3} = \frac{Va - Vo}{Rf}$$

Como $Vd = 0 - Va = 0$, $Va = 0$ (novamente, o "terra virtual"). Substituindo $Va = 0$ na equação acima, teremos:

$$\frac{V1}{R1} + \frac{V2}{R2} + \frac{V3}{R3} = -\frac{Vo}{Rf}$$

Que resulta em:

$$Vo = -(\frac{Rf}{R1}V1 + \frac{Rf}{R2}V2 + \frac{Rf}{R3}V3)$$

Ou seja, a tensão de saída será uma combinação linear das tensões de entrada. Bastaria que os quatro resistores do circuito fossem iguais entre si para termos, como tensão de saída, a soma algébrica das tensões de entrada. É a partir do projeto desses resistores que podemos fazer uma calculadora analógica!

2.4 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL OU SUBTRATOR

A Figura 11 apresenta a configuração elétrica de um amplificador diferencial.

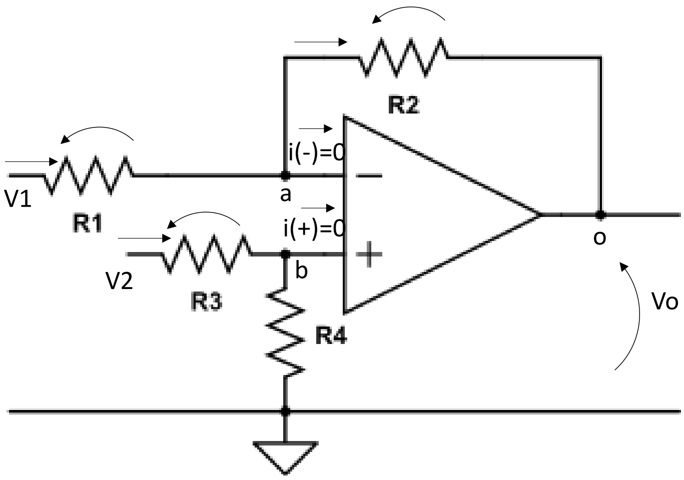


Figura 11: Circuito do amplificador diferencial.

Novamente, aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes no nó a, teremos:

$$\frac{V1 - Va}{R1} = \frac{Va - Vo}{R2}$$

$$\mathrm{R2V1} - \mathrm{R2Va} = \mathrm{R1Va} - \mathrm{R1Vo}$$

$$-Vo = \frac{R2V1}{R1} - \frac{R2Va}{R1} - Va$$

$$Vo = \left(\frac{R2}{R1} + 1\right)Va - \frac{R2}{R1}V1$$

Aplicando agora a Lei de Kirchhoff das correntes no nó b, teremos:

$$\frac{V2 - Vb}{R3} = \frac{Vb}{R4}$$

Como $Vd = Vb - Va = 0$, teremos:

$$Va = Vb$$

E substituindo na equação do nó b, teremos:

$$\frac{V2 - Va}{R3} = \frac{Va}{R4}$$

$$Va = \frac{R4}{R3 + R4} V2$$

$$Va = \frac{V2}{1 + R3/R4}$$

Retomando a equação do nó a, teremos:

$$Vo = \frac{R2}{R1}(1 + R1/R2)Va - \frac{R2}{R1}V1$$

Que resulta em:

$$Vo = \frac{\mathrm{R2}}{\mathrm{R1}}\frac{(1 + \mathrm{R1}/\mathrm{R2})}{(1 + R3/R4)}V2 - \frac{R2}{R1}V1$$

Ou seja, a tensão de saída será uma combinação linear das tensões de entrada V1 e V2. Mais uma vez, bastaria que os quatro resistores do circuito fossem iguais entre si para termos, como tensão de saída, a diferença algébrica das tensões de entrada!

2.5 O CIRCUITO COMPARADOR

Dentre as configurações mais simples e mais usuais de um amplificador operacional está a de um circuito comparador. Simples porque não há nenhum outro componente no circuito além do próprio AmpOp, e usual porque o usaremos em muitas aplicações, tais como detectores de presença, luz, humidade, assim como em um circuito que modula a largura de pulso (em inglês, PWM). Contudo, lembre-se que é preciso alimentá-lo para que funcione!

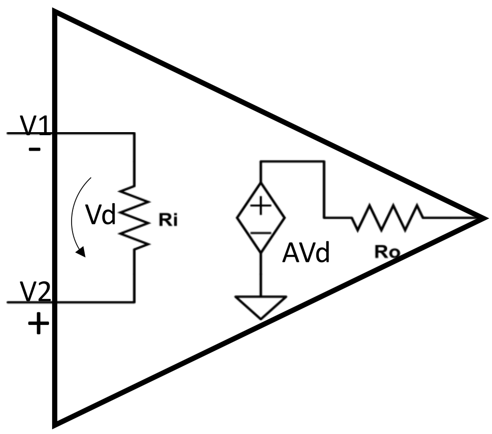


Figura 12: Circuito comparador.

Para entendermos como funciona o circuito comparador (usando o modelo ideal), considere que, quando $V1 > V2$:

$Vd = V2 - V1$

Mas, como a tensão de saída é função de Vd, teremos:

$Vo = A \cdot (V2 - V1)$

Sendo $A = \infty$, $Vo = -\infty$

Mas, como a tensão de saída está limitada a $\mp Vcc$, $Vo = -Vcc$

Analogamente, quando $V2 > V1$:

$Vo = +Vcc$

Em resumo, quando a tensão $V2$ (não inversora) é maior que a tensão $V1$ (inversora), a saída será $+Vcc$. Ao contrário, quando a tensão $V1$ for maior que $V2$, a tensão de saída será $-Vcc$. Resta-nos saber como usá-lo num circuito detector de humidade, por exemplo. Vamos ter oportunidade de trabalhar com isso nos projetos e nos exercícios em sala.