

# Aula 9

## Amplificador Operacional

Gerardo Rocha

# Amplificador operacional

Além dos componentes passivos, resistências e condensadores, os circuitos eletrônicos analógicos e digitais, são construídos a partir de componentes ativos tais como díodos ou transístores, que normalmente são feitos de silício.

Um outro bloco usado na montagem de circuitos que está disponível no mercado na forma de circuito integrado, com as características aos seus terminais bem definidas, é o amplificador operacional.

Apesar do circuito interno de um amplificador operacional ser relativamente complexo, as características quase ideais aos seus terminais tornam possível o seu tratamento como se de um circuito elementar se tratasse, permitindo o projeto de circuitos complexos sem qualquer conhecimento da sua constituição interna.

# Amplificador operacional

Na década de 1960 foi produzido o primeiro amplificador operacional integrado, o  $\mu\text{A}$  709.

Este circuito integrado usava um número relativamente grande de transístores e resistências fabricados no mesmo chip de silício.

Apesar de as suas características serem relativamente fracas e o preço um pouco alto, o seu aparecimento assinalou uma nova era no projeto de circuitos eletrónicos.

Começaram-se a usar amplificadores operacionais em grandes quantidades, o que causou que o seu preço baixasse.

Houve uma necessidade de circuitos com melhores performances e em poucos anos começaram a aparecer amplificadores operacionais de alta qualidade e a preços extremamente baixos.

# Amplificador operacional

Uma das razões da popularidade do amplificador operacional é a sua versatilidade.

Como será visto de seguida, pode-se fazer quase tudo em eletrónica com amplificadores operacionais.

Igualmente importante é o facto de os amplificadores operacionais atuais terem características que se aproximam ao que é assumido como ideal, o que significa que é relativamente simples projetar circuitos eletrónicos usando estes componentes.

# Amplificador operacional

Como já foi visto, um amplificador operacional usa um número elevado de transístores, algumas resistências e normalmente um condensador, ligados num circuito mais ou menos complexo.

O amplificador operacional irá ser tratado como uma “caixa negra” em que só interessam as aplicações e as características aos seus terminais.

Esta abordagem é satisfatória em praticamente todas as aplicações de amplificadores operacionais.

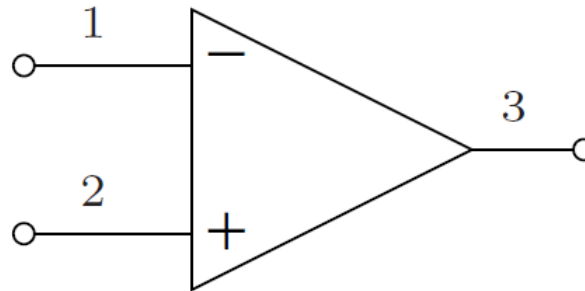
Apesar disso, é sempre vantajoso ter uma noção do que é que existe dentro do invólucro do circuito integrado.

# Os terminais do amplificador operacional

Sob o ponto de vista do sinal, o amplificador operacional tem três terminais:

- dois de entrada e um de saída.

A figura mostra o símbolo que é usado para representar um amplificador operacional.

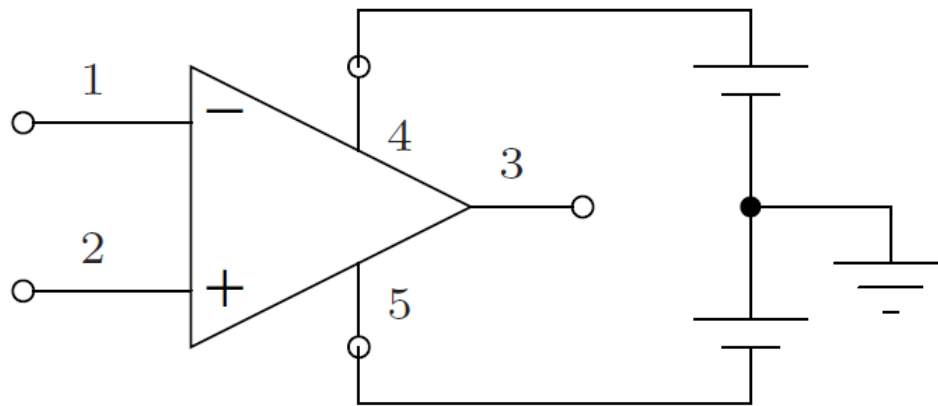


Os terminais 1 e 2 são as entradas inversora e não inversora respectivamente. O terminal 3 é a saída.

# Os terminais do amplificador operacional

Todos os amplificadores necessitam de ser alimentados por tensões contínuas para funcionarem.

A maior parte dos amplificadores operacionais necessita de duas fontes de tensão contínuas, tal como mostra a figura.



Os terminais assinalados como 4 e 5 são ligados respetivamente a uma tensão positiva e uma negativa.

# Os terminais do amplificador operacional

É interessante notar que a tensão de referência de terra apenas é ligado ao terminal comum das duas fontes de tensão, ou seja, os circuitos integrados amplificadores operacionais não têm um pino para serem ligados fisicamente à terra.

Normalmente, nos circuitos com amplificadores operacionais, as ligações às fontes de tensão não são representadas.

Além dos três terminais para os sinais e dos dois para a alimentação, um amplificador operacional pode ter outros terminais com funções específicas, tais como compensação em frequência e de offset.



# O amplificador operacional ideal

Considere-se o princípio de funcionamento do amplificador operacional.

O amplificador operacional é projetado para calcular a diferença entre a tensão dos sinais aplicados nas suas entradas e multiplicá-la por um número  $A$ , aparecendo na saída um sinal cuja tensão é dada por  $v_o = A(v_2 - v_1)$ .

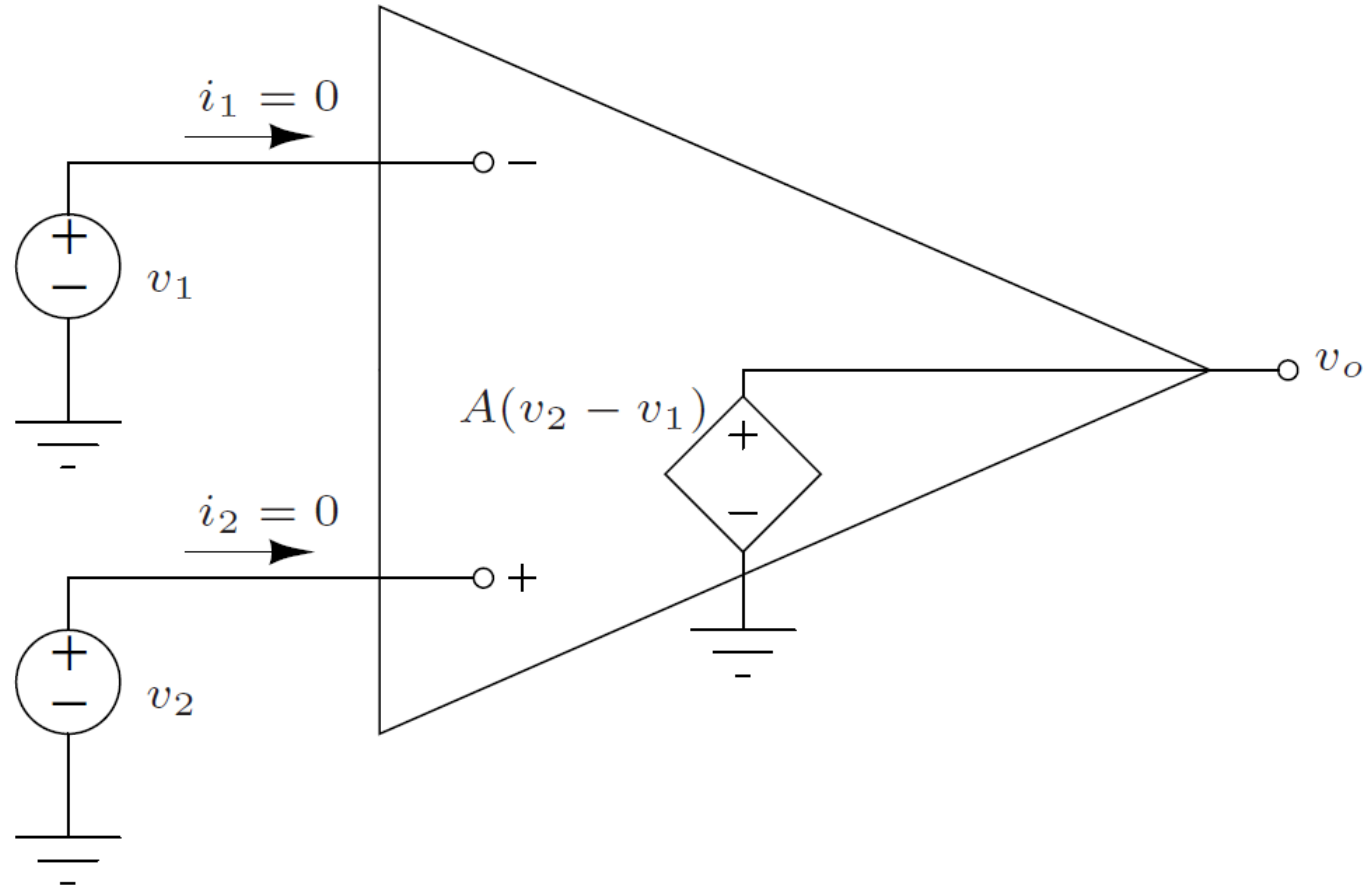
O amplificador operacional ideal tem uma impedância de entrada infinita, ou seja, a corrente nos seus terminais de entrada é nula.

O terminal de saída deve atuar como uma fonte de tensão ideal, ou seja, a tensão entre o terminal de saída e a terra deve ser sempre igual a  $A(v_2 - v_1)$  e independente da corrente que este fornece à carga.

A impedância de saída de um amplificador operacional ideal deve ser nula.

# O amplificador operacional ideal

Colocando em conjunto tudo o que foi dito até aqui, chega-se ao modelo de circuito equivalente da figura.



O sinal de saída está em fase com  $v_2$  e em oposição de fase com  $v_1$ .

Por essa razão, diz-se que a fonte de tensão  $v_1$  está ligada à entrada inversora (assinalada com -) e a fonte  $v_2$  está ligada à entrada não inversora (assinalada com +).

# O amplificador operacional ideal

O amplificador operacional responde à diferença entre os sinais  $v_2 - v_1$  e ignora o sinal comum às duas entradas.

Se  $v_1 = v_2 = 1\text{ V}$ , a saída seria idealmente nula.

Esta propriedade é chamada de “rejeição do modo comum”.

O amplificador ideal tem uma rejeição do modo comum infinita.

O amplificador operacional é um amplificador com entrada diferencial e saída única e o ganho  $A$  é chamado de “ganho diferencial”.

Outro nome para  $A$  é “ganho em malha aberta”.

# O amplificador operacional ideal

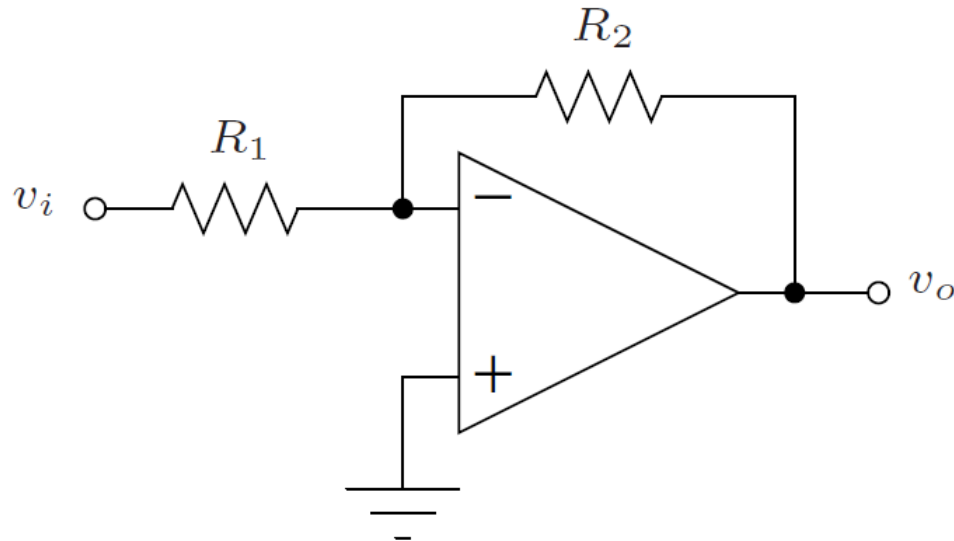
Os amplificadores operacionais são dispositivos com acoplamento direto, ou seja, não são usados elementos de acoplamento entre os seus andares, o que permite amplificar sinais com frequências muito baixas.

O amplificador operacional ideal tem um ganho que permanece constante para frequências desde zero até infinitas.

O amplificador operacional ideal deve ter um ganho  $A$  cujo valor é infinito.

- Mas com um ganho infinito, a saída não irá ser sempre infinita?
- O amplificador operacional normalmente não é usado sozinho em configurações de malha aberta.
- Em vez disso, é usada realimentação negativa que torna o ganho mais baixo e mais estável.

# Configuração inversora



$R_2$  está ligada entre o terminal de saída e o terminal da entrada inversora do amplificador operacional, ou seja está a fazer uma realimentação negativa.

Se  $R_2$  estivesse ligada entre a saída e a entrada não inversora, estaria-se na presença de uma realimentação positiva.

# Configuração inversora

R2 fecha a malha em torno do amplificador operacional.

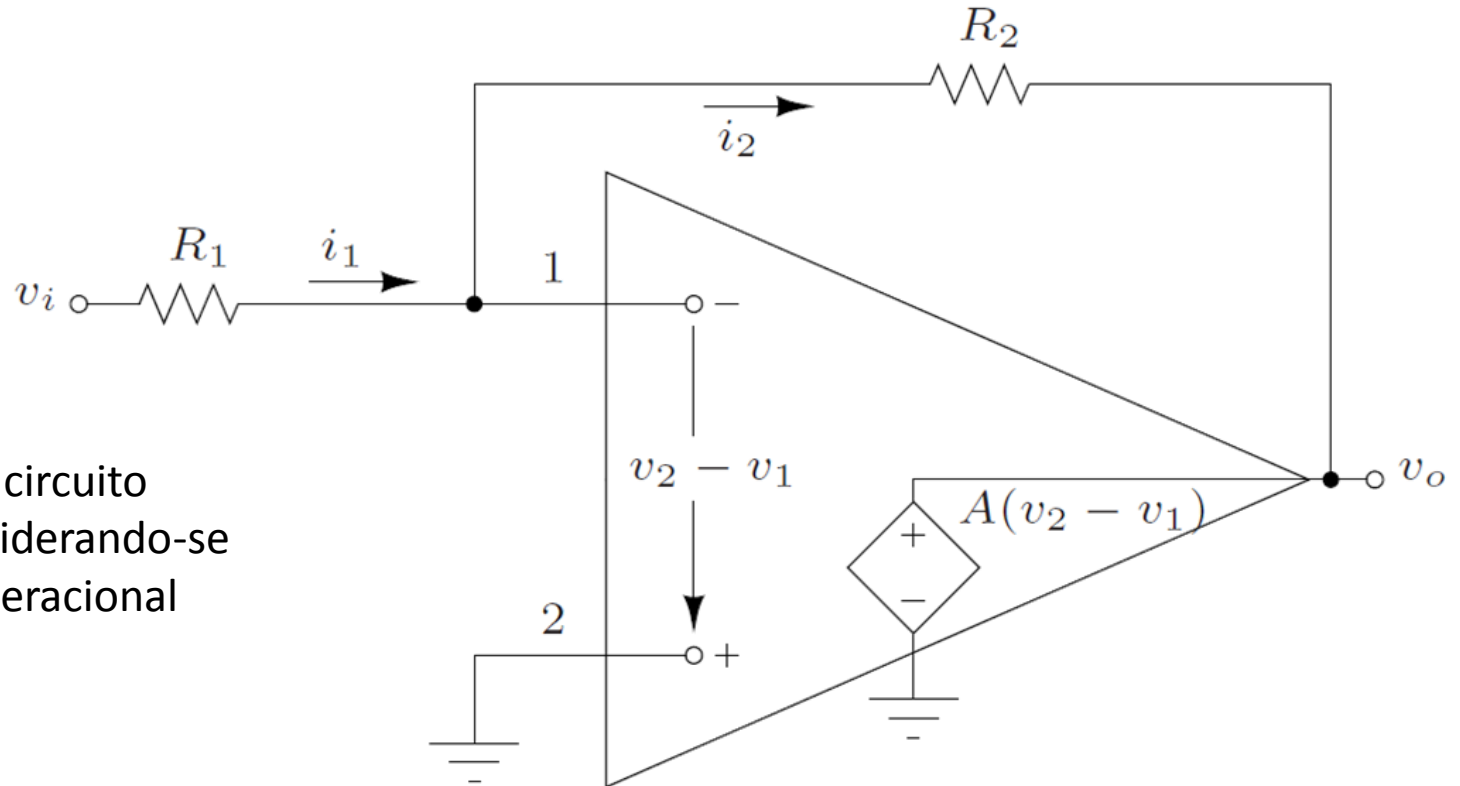
O terminal não inversor está ligado à terra e a fonte de sinal  $v_i$  está ligada ao terminal inversor através de R1.

A tensão de saída do circuito está entre o terminal de saída e a terra, que é um bom ponto de saída do circuito, uma vez que a impedância é idealmente nula.

Isto significa que a tensão de saída não depende do valor da corrente que é fornecida à carga.

# Ganho em malha fechada

A figura mostra o circuito equivalente, considerando-se o amplificador operacional ideal.



$$G = \frac{v_o}{v_i}.$$

# Ganho em malha fechada

O ganho  $A$  é muito elevado (idealmente infinito).

Assumindo que o circuito está a funcionar e que à sua saída está um valor de tensão finito, então a tensão entre as duas entradas do amplificador operacional deve ser muito próxima de zero, ou seja:

$$v_2 - v_1 = \frac{v_o}{A} \simeq 0.$$

Daqui se tira uma conclusão importante: a tensão na entrada inversora é sensivelmente igual à da entrada não inversora, ou seja,  $v_1 \simeq v_2$ .

Devido ao facto de o ganho se aproximar de infinito,  $v_1$  aproxima-se de  $v_2$ .



# Ganho em malha fechada

Isto pode ser dito de várias formas, como por exemplo, a entrada inversora segue a não inversora ou que existe um curto-circuito virtual entre as duas entradas.

Um curto-circuito virtual não significa de modo algum que as duas entradas estejam ligadas entre si, mas sim que qualquer que seja o valor de  $v_2$ , este aparecerá em  $v_1$  devido ao ganho ser infinito.

Na montagem inversora o terminal não inversor está ligado à terra, portanto  $v_2 = 0$  e  $v_1 \simeq 0$ .

Neste caso diz-se que o terminal da entrada inversora está à terra virtual, ou seja, tem a tensão de 0 V , mas não está ligado fisicamente à terra.

# Ganho em malha fechada

Agora que o valor de  $v_1$  é conhecido, para calcular o valor de  $i_1$  basta aplicar a lei de Ohm:

$$i_1 = \frac{v_i - v_1}{R_1} \simeq \frac{v_i}{R_1}$$

Esta corrente não pode ir para a entrada do amplificador operacional, visto que a sua impedância de entrada é infinita.

$i_1$  terá que ir para o terminal de saída, através de  $R_2$ . Nesse caso,  $i_1 = i_2$  e aplicando a lei de Ohm fica:

$$i_1 = \frac{v_1 - v_o}{R_2} = \frac{0 - v_o}{R_2}$$

Portanto: 
$$\frac{v_i}{R_1} = \frac{0 - v_o}{R_2}$$

ou seja, o ganho em malha fechada é dado por:

$$G = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

# Ganho em malha fechada

Daqui se pode ver que o ganho em malha fechada é dado pela razão entre as duas resistências.

O sinal de menos significa que o amplificador em malha fechada inverte o sinal.

Por exemplo, se  $R2/R1 = 10$  e  $v_i$  for uma senoide com 1 Vpp, então na saída aparecerá uma senoide com 10 Vpp e com a fase deslocada de  $180^\circ$  em relação ao sinal de entrada.

Devido a este sinal de menos, este circuito é chamado de amplificador inversor.

# Ganho em malha fechada

O facto de o ganho depender apenas de componentes passivos externos é muito importante, já que permite a implementação de amplificadores com ganhos muito precisos, bastando para isso seleccionar resistências com a precisão apropriada.

Também significa que o ganho da montagem é independente do ganho do amplificador operacional.

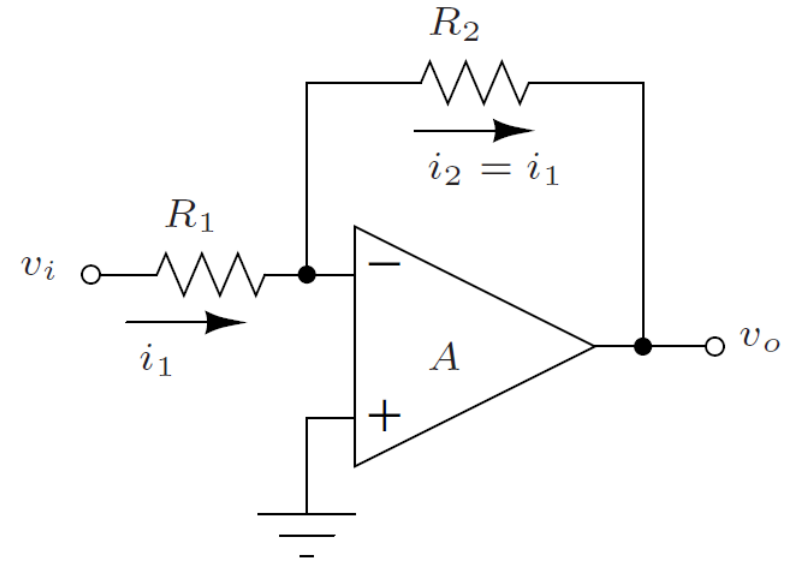
Esta é uma boa ilustração da realimentação negativa: Começou-se com um amplificador de ganho muito alto e conseguiu-se uma montagem com um ganho muito mais baixo, mas estável e previsível.

# Efeito do ganho em malha aberta finito

Dedução da expressão para o ganho em malha fechada assumindo que o ganho em malha aberta é finito e igual a  $A$ .

Se a tensão de saída for  $v_o$ , a tensão entre os dois terminais de entrada do amplificador operacional é  $v_o/A$ .

Como o terminal não inversor está ligado à terra, a tensão no terminal inversor é de  $-v_o/A$ .



# Efeito do ganho em malha aberta finito

A corrente  $i_1$  é dada por:

$$i_1 = \frac{v_i + v_o/A}{R_1}$$

Devido à muito alta impedância de entrada do amplificador operacional, a corrente  $i_1$  vai circular através de  $R_2$ .

A tensão de saída pode ser deduzida a partir de:

$$v_o = -\frac{v_o}{A} - R_2 i_1 = -\frac{v_o}{A} - \left( \frac{v_i + v_o/A}{R_1} \right) R_2$$

Agrupando os termos, o ganho em malha fechada é dado por:

$$G = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A}$$

# Efeito do ganho em malha aberta finito

Note-se que quando  $A$  tende para infinito, o valor do ganho em malha fechada aproxima-se do seu valor ideal  $-R_2/R_1$ .

Também se pode concluir que quando  $A$  tende para infinito, a tensão na entrada inversora tende para zero.

Isto justifica a terra virtual que foi assumida na análise anterior com o amplificador operacional ideal.

Para que a influência do ganho em malha aberta  $A$  no ganho em malha fechada  $G$  seja mínima, deve verificar-se a condição:

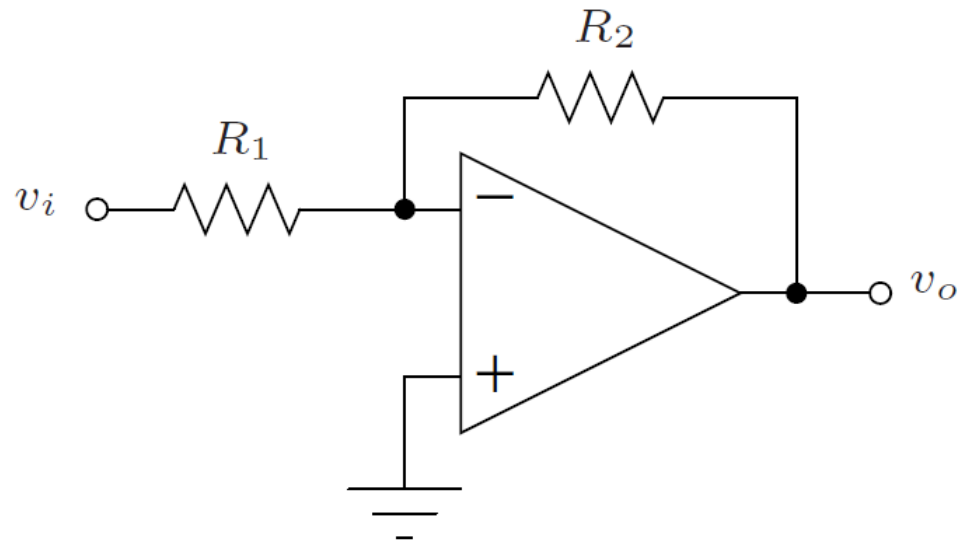
$$1 + \frac{R_2}{R_1} \ll A$$

# Exemplo

Considere a configuração amplificadora inversora da figura com  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ .

(a) Calcule o ganho em malha fechada para os casos em que o ganho em malha aberta  $A = 1000, 10\,000$  e  $100\,000$ . Para cada caso, determine a percentagem de erro no valor do ganho em malha fechada relativamente ao seu valor ideal. Determine ainda o valor da tensão na entrada inversora, quando  $v_i = 0.1 \text{ V}$ .

(b) Se o ganho em malha aberta baixar de  $100\,000$  para  $50\,000$ , qual é o valor em percentagem da variação no ganho em malha fechada?





O ganho em malha fechada é dado por:

$$G = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A}.$$

Para  $A = 10^3$ ,  $G = -90.83$ .

Para  $A = 10^4$ ,  $G = -99.00$ .

Para  $A = 10^5$ ,  $G = -99.90$ .

O ganho ideal é dado por  $-R_2/R_1 = -100$ . O erro,  $\varepsilon$ , é dado por:

$$\varepsilon = \frac{G_{real} - G_{ideal}}{G_{ideal}}.$$

Para  $A = 10^3$ ,  $\varepsilon = 9.17\%$ .

Para  $A = 10^4$ ,  $\varepsilon = 1.00\%$ .

Para  $A = 10^5$ ,  $\varepsilon = 0.10\%$ .

O valor de  $v_o$  é dado por  $v_o = G v_i$ :

Para  $A = 10^3$ ,  $v_o = 908.3 \text{ mV}$ .

Para  $A = 10^4$ ,  $v_o = 990.0 \text{ mV}$ .

Para  $A = 10^5$ ,  $v_o = 999.0 \text{ mV}$ .

A tensão na entrada inversora,  $v_1 = -v_o/A$ :

$$\text{Para } A = 10^3, \quad v_1 = 908.3 \mu\text{V}.$$

$$\text{Para } A = 10^4, \quad v_1 = 99 \mu\text{V}.$$

$$\text{Para } A = 10^5, \quad v_1 = 9.99 \mu\text{V}.$$

(b) O ganho em malha fechada é dado por:

$$G = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A}.$$

Expressando os resultados com 3 casas decimais:

$$\text{Para } A = 10^5, \quad G = -99.899.$$

$$\text{Para } A = 5 \times 10^4, \quad G = -99.798.$$

A percentagem da alteração é de:

$$\frac{99.899 - 99.798}{99.899} \times 100\% = 0.101\%.$$

Isto significa que neste circuito, se o ganho em malha aberta passar para metade, o ganho em malha fechada desce apenas 0.101%.

# Impedâncias de entrada e de saída

Assumindo que o amplificador operacional tem um ganho infinito, a impedância de entrada do amplificador inversor é dada simplesmente pelo valor de  $R_1$ , ou seja:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_1$$

Para que a impedância de entrada seja alta, deve escolher-se um valor alto para  $R_1$ .

No entanto, se o ganho pretendido também for alto, o valor de  $R_2$  pode tornar-se demasiadamente alto (acima de alguns Megaohms).

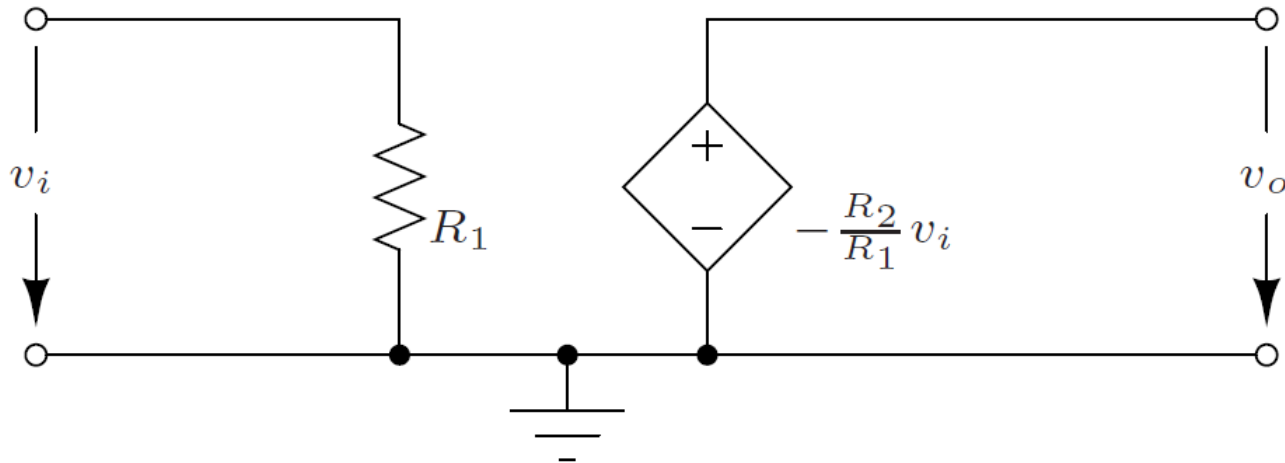
Daqui se conclui que a configuração inversora tem uma baixa impedância de entrada.

O facto de o ganho em malha aberta ser finito tem muito pouca influência na impedância de entrada.

# Impedâncias de entrada e de saída

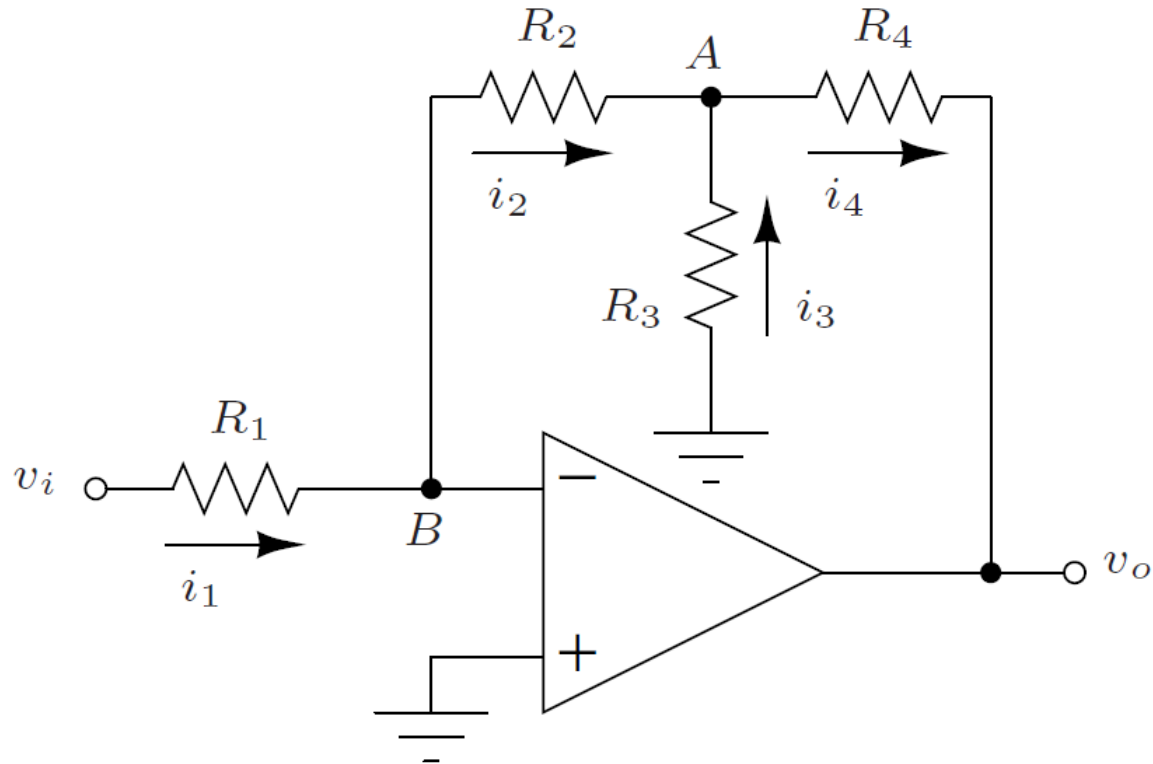
Como a tensão de saída da configuração inversora é retirada dos terminais de uma fonte de tensão ideal, a impedância de saída do amplificador em malha fechada é idealmente nula.

A partir do que foi dito anteriormente, considerando o amplificador operacional ideal, chega-se ao modelo do amplificador inversor da figura:



# Exemplo

Considerando o amplificador operacional ideal, obtenha uma expressão para o ganho em malha fechada do circuito da figura. Dimensione os valores das resistências para que o ganho da montagem seja de 100 e a impedância de entrada de 1 M $\Omega$ . Não são permitidas resistências maiores do que 1 M $\Omega$ .



Como o amplificador operacional é ideal, o seu ganho é infinito, logo  $v_B = 0$ .  
A corrente  $i_1$  é dada por:

$$i_1 = \frac{v_i - v_B}{R_1} = \frac{v_i}{R_1}.$$

Como a corrente que entra no amplificador operacional é nula:

$$i_2 = i_1 = \frac{v_i}{R_1}.$$

A tensão no nó  $A$  é dada por:

$$v_A = v_B - R_2 i_2 = -\frac{R_2}{R_1} v_i.$$

A corrente  $i_3$  é de:

$$i_3 = \frac{-v_A}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} v_i.$$

A corrente  $i_4$  é dada por:

$$i_4 = i_2 + i_3 = \frac{v_i}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} v_i.$$

Finalmente, para determinar  $v_o$ :

$$v_o = v_A - R_4 i_4 = -\frac{R_2}{R_1} v_i - \left( \frac{v_i}{R_1} + \frac{R_2}{R_1 R_3} v_i \right) R_4.$$

E para o ganho vem:

$$G = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right).$$

Para se obter uma impedância de entrada de  $1\text{ M}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{ M}\Omega$ . Admita-se que o primeiro factor da expressão do ganho  $(R_2/R_1)$  é igual a 1. Neste caso,  $R_2 = 1\text{ M}\Omega$ . O segundo factor do ganho deve ser igual a 100, logo  $(R_4/R_2) + (R_4/R_3) = 99$ . Neste caso, atribuindo o valor de  $1\text{ M}\Omega$  a  $R_4$ ,  $R_3 = 10.2\text{ k}\Omega$ .

É de notar que se fosse usada a configuração amplificadora inversora da figura 7.4, seria necessária uma resistência  $R_2 = 100\text{ M}\Omega$ , ou seja, um valor demasiadamente elevado para este tipo de aplicações.