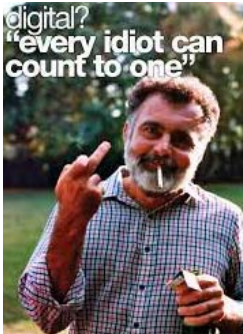


# *Sinais e Sistemas Electrónicos*



## *Capítulo 6: Amplificadores operacionais*

### *(parte 1)*



Ernesto Martins  
[evm@ua.pt](mailto:evm@ua.pt)  
DETI (gab. 4.2.38)  
Universidade de Aveiro



Sinais e Sistemas Electrónicos – 2023/2024

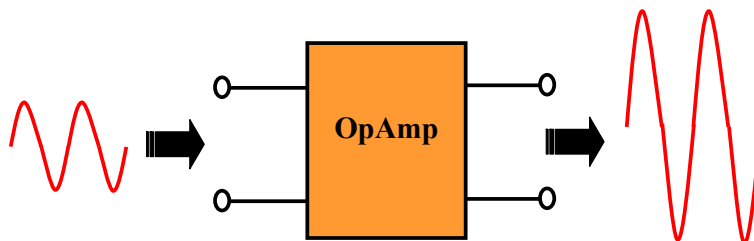
## **Sumário**

- **Amplificador operacional: fundamentos;**
- **Modelo equivalente simplificado;**
- **Realimentação: configuração inversora;**
- **Calculo o ganho;**
- **Modelo ideal do OpAmp;**
- **Noção de curto-circuito virtual na entrada;**
- **Configuração não-inversora;**
- **Limites do modelo ideal.**

## Fundamentos e modelo simplificado

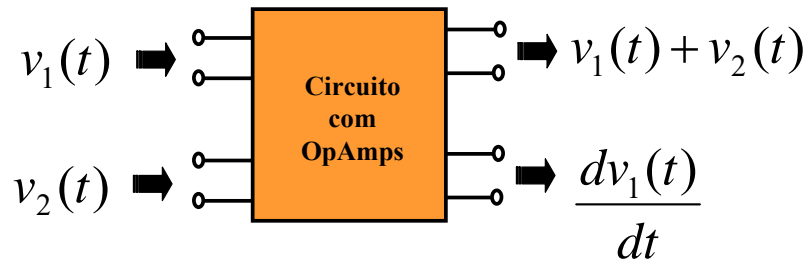
### Amplificador Operacional ou *OpAmp*

**Amplificador** – Porque transforma (*amplifica*) um sinal eléctrico (tensão) de pequeno valor, numa réplica de maior valor.



## Amplificador Operacional ou *OpAmp*

**Operacional** – Porque é usado em circuitos que realizam *operações* matemáticas (soma, multiplicação, derivação, etc.) em um ou mais sinais eléctricos.



## Como se apresenta fisicamente?



**K2-W (1953) primeiro OpAmp modular (alimentado a 600V)**

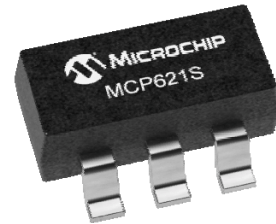
**$\mu$ A709 (1965)**

Segundo OpAmp monolítico da história. Primeiro a gozar de grande sucesso comercial.

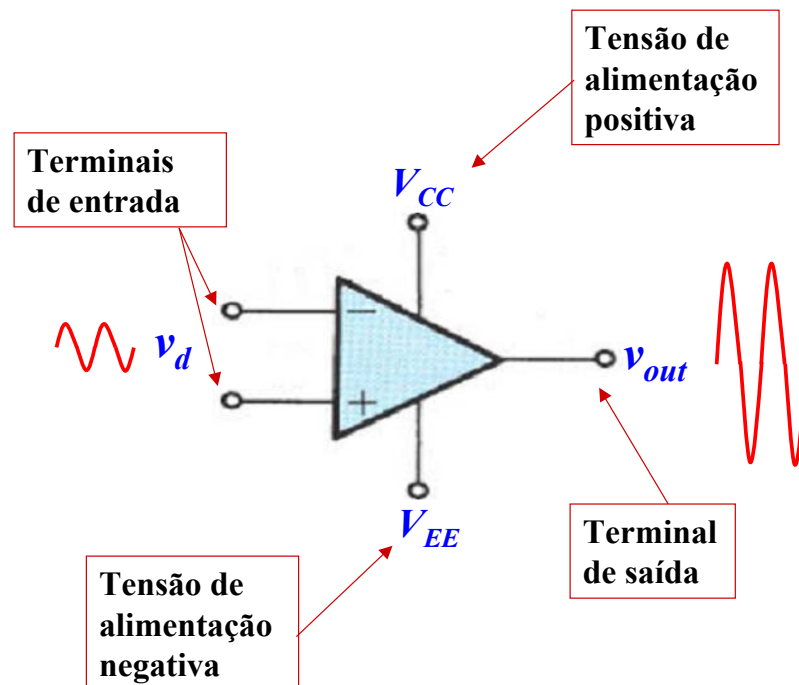


## Como se apresenta fisicamente?

### OpAmps modernos

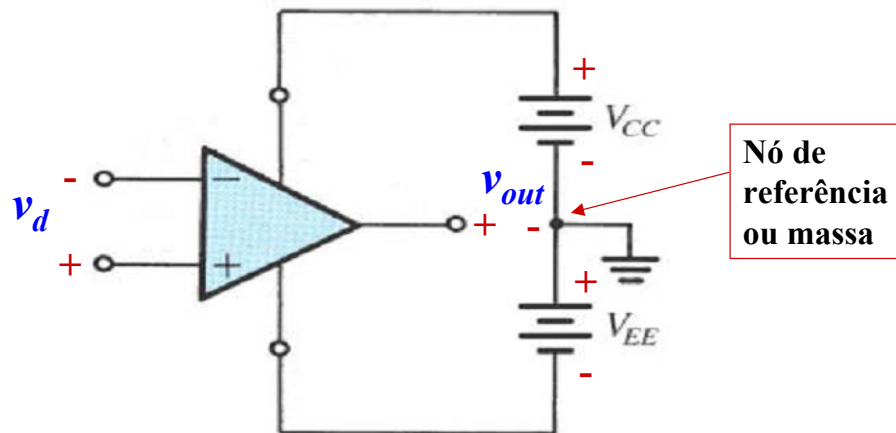


## Simbolo e terminais



## Sinais de entrada e saída

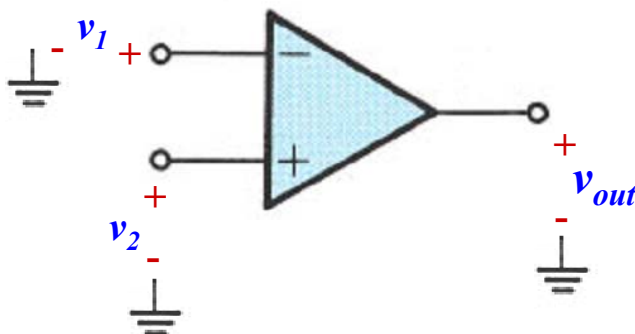
- O OpAmp amplifica a tensão  $v_d$  aplicada entre as duas entradas (+) e (-);
- A tensão de saída,  $v_{out}$ , é medida em relação ao ponto comum das duas tensões de alimentação – o **nó de referência** ou massa.



## Ganho do OpAmp

- Para simplificar, é costume omitir-se as ligações de alimentação;
- $V_d$  é a chamada **tensão diferencial** de entrada do OpAmp:

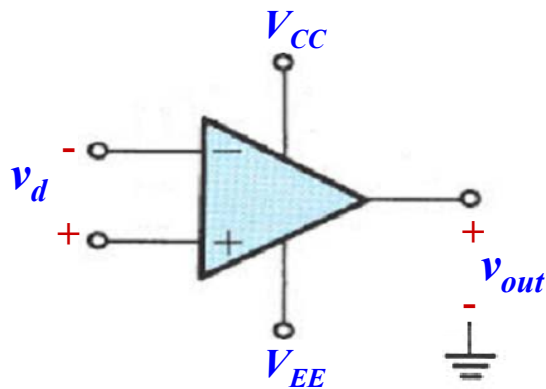
$$v_d = v_2 - v_1$$



$$v_{out} = A(v_2 - v_1)$$

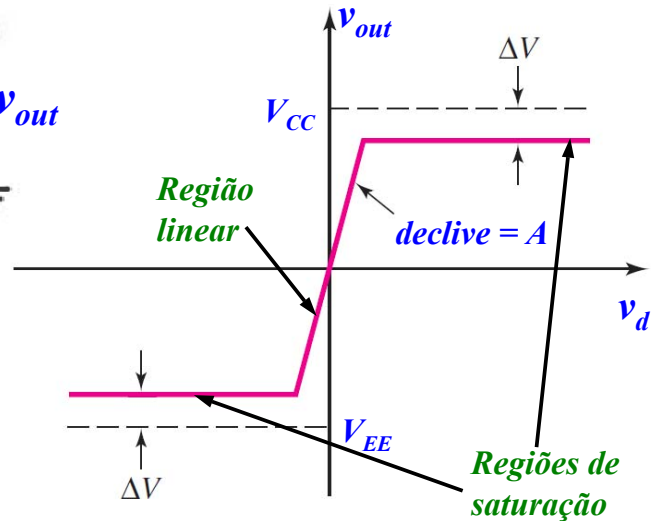
**Ganho do OpAmp**

## Característica entrada/saída do OpAmp



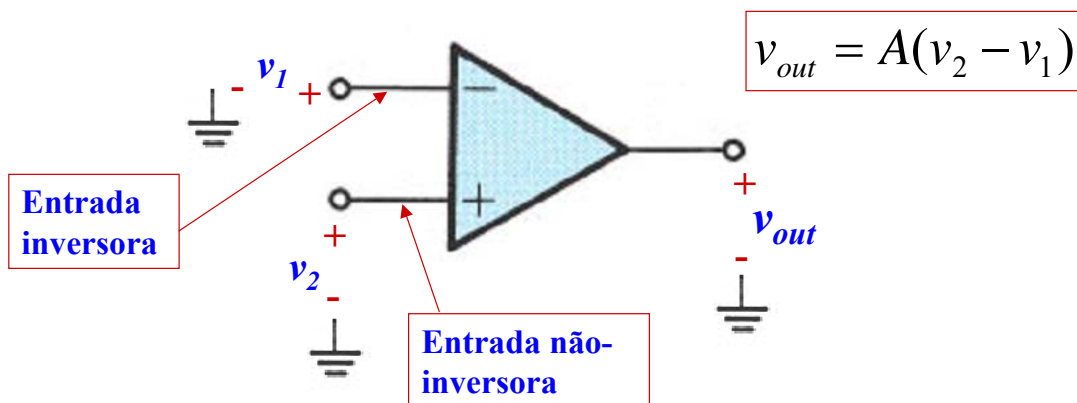
- $V_{CC}$  e  $V_{EE}$  são **15** e **-15V** no máximo;
- $A$  (ganho) pode ser da ordem de  **$10^6$** .

- $v_{out}$  é limitado;
- $\Delta V$  pode variar entre 0 e  $\sim 2V$ .

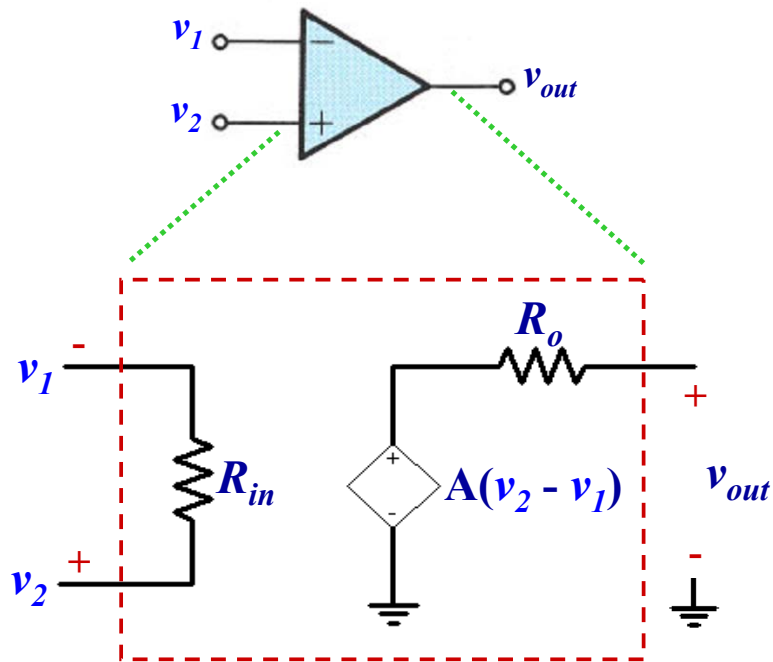


## Entradas inversora e não-inversora

- **Entrada inversora**: marcada com (-)  $\Rightarrow$  Porque a tensão  $v_1$  aparece na equação de  $v_{out}$  com o sinal (-): se  $v_1$  aumentar  $v_{out}$  diminui;
- **Entrada não inversora**: marcada com (+)  $\Rightarrow$  Porque a tensão  $v_2$  aparece na equação de  $v_{out}$  com o sinal (+): se  $v_2$  aumentar  $v_{out}$  aumenta.



## Modelo equivalente do OpAmp



- $R_{in}$  – resistência de entrada;
- $R_o$  – resistência de saída;
- $A$  – ganho em tensão.

**NOTA:** Modelo só é válido se o OpAmp estiver a funcionar na região linear!

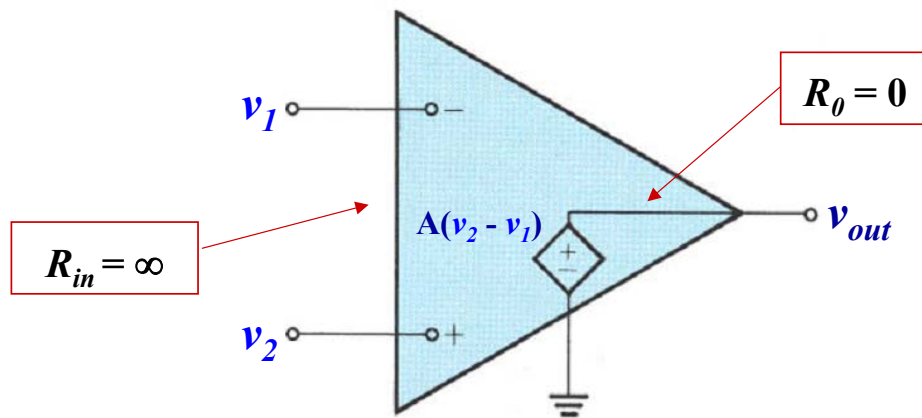
## OpAmp – valores típicos

$A$  – ganho em tensão,  $R_{in}$  – resistência de entrada;  $R_o$  – resistência de saída.

Part Number	$\mu A741$	LM324	LF411	AD549K
Description	General purpose	Low-power quad	Low-offset, low-drift JFET input	Ultralow input bias current
Open loop gain $A$	$2 \times 10^5$ V/V	$10^5$ V/V	$2 \times 10^5$ V/V	$10^6$ V/V
Input resistance	2 M $\Omega$	*	1 T $\Omega$	10 T $\Omega$
Output resistance	75 $\Omega$	*	$\sim 1$ $\Omega$	$\sim 15$ $\Omega$

## Modelo simplificado do OpAmp

- Em geral  $R_{in}$  é muito elevado e  $R_o$  é muito pequeno comparado com os valores das resistências usadas nos circuitos;
- Pelo que, na prática, adopta-se um modelo mais simples para o OpAmp:



## Realimentação



## OpAmp e *feedback*

- Mas por que razão são os OpAmps fabricados com ganhos tão elevado?

**R:** Para serem usados em circuitos com **realimentação (feedback) negativa?**

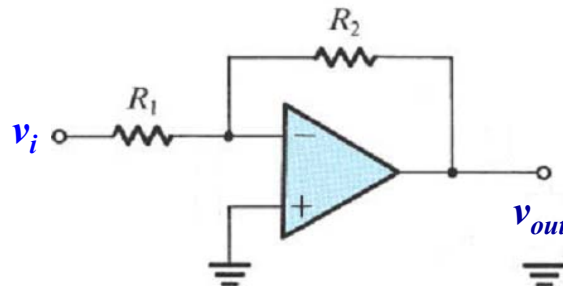
- Com realimentação negativa os circuitos resultantes não têm um ganho tão elevado, mas passam a gozar de vários benefícios:

- Ganho depende apenas de componentes exteriores ao OpAmp;
- Melhor linearidade (menor distorção);
- Maior largura de banda;
- Melhores características de resistência de entrada e saída.

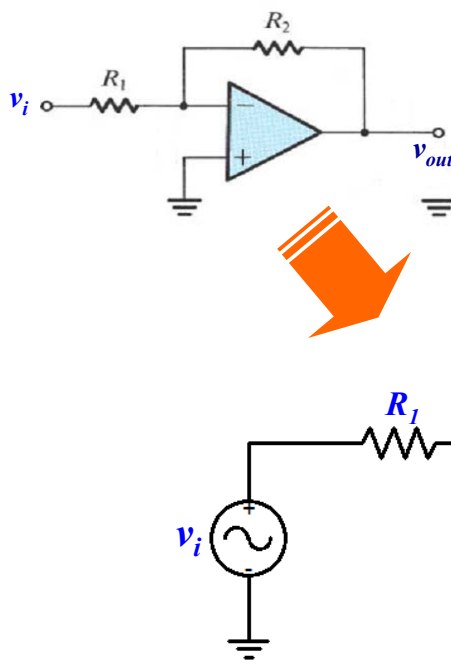
## Configuração inversora

## Configuração inversora do OpAmp

- Utiliza duas resistências numa configuração de **realimentação negativa** (ou *feedback* negativo);
- A configuração chama-se **inversora** porque quando a tensão de entrada,  $v_i$ , aumenta a tensão de saída,  $v_{out}$ , diminui.



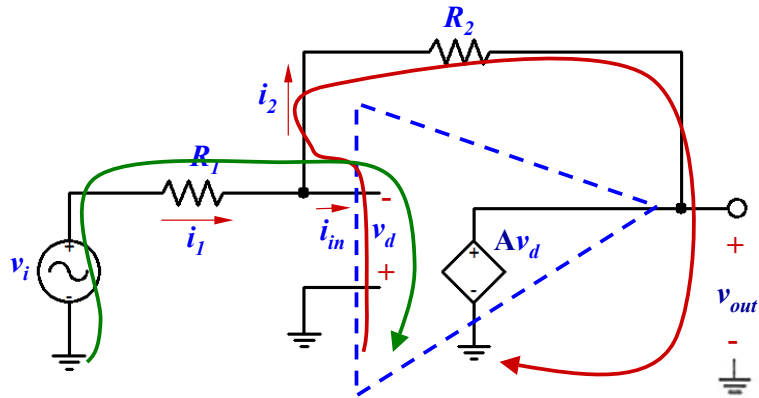
## Configuração inversora do OpAmp



Para analisar o circuito  
substituímos o OpAmp pelo  
**modelo equivalente**

## Configuração inversora do OpAmp

- Queremos obter o **ganho do circuito**, ou seja, uma relação matemática entre  $v_{out}$  e  $v_i$ .



- Loop de entrada (a verde):  $-v_i + R_1 i_1 - v_d = 0$
- Loop de saída (a vermelho):  $v_d + R_2 i_2 + v_{out} = 0$

## Configuração inversora do OpAmp

- Sabemos que

$$i_{in} = 0 \Rightarrow i_2 = i_1$$

$$v_{out} = Av_d$$

- Substituindo nas equações anteriores:

$$\begin{cases} -v_i + R_1 i_1 - \frac{v_{out}}{A} = 0 \\ \frac{v_{out}}{A} + R_2 i_1 + v_{out} = 0 \end{cases}$$

- Eliminando  $i_1$ , obtemos:

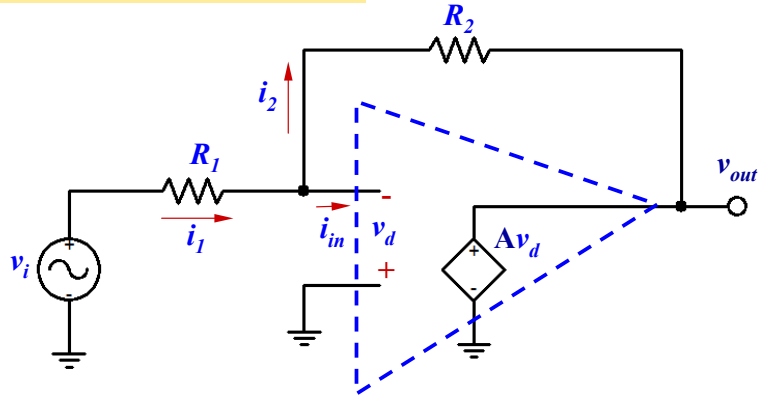
$$v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{1}{A}} v_i$$

## Configuração inversora do OpAmp

- À razão  $v_{out} / v_i$  chamamos **ganho em malha fechada**, ou apenas **ganho do circuito**.

$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i}$$

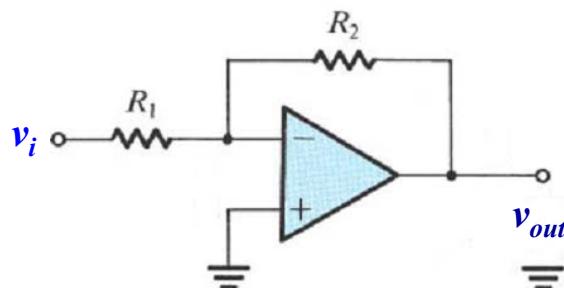
$$G = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \frac{1}{A}}$$



- Para os valores tipicamente muito elevados de  $A$  a equação do ganho reduz-se a

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

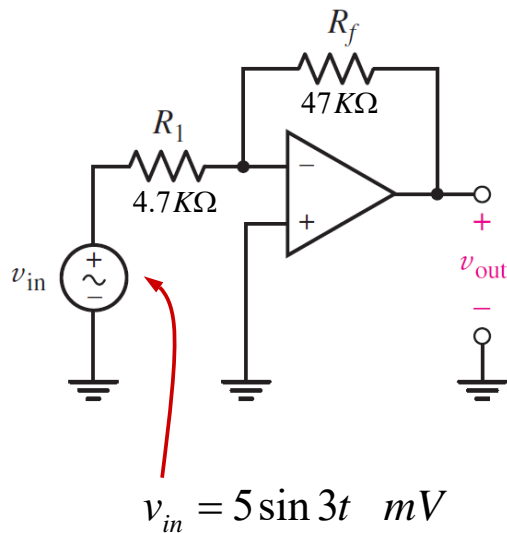
## Configuração inversora do OpAmp



$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

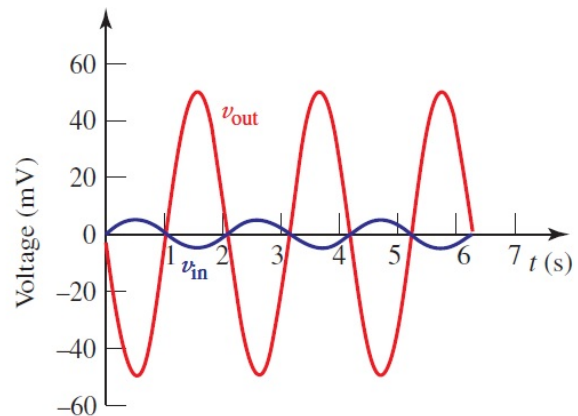
- Este é um **resultado notável** dos circuitos com feedback negativo em geral, e dos OpAmps em particular:
  - O Ganho **depende apenas do valor de resistências exteriores** ao OpAmp;
  - O valor do ganho em tensão do OpAmp,  $A$ , **não é relevante** desde que seja suficientemente elevado;
- O sinal  $(-)$  no ganho indica que há inversão da entrada para a saída.

## Configuração inversora - exemplo



$$G = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{47}{4.7} = -10$$

$$v_{out} = -50 \sin 3t \text{ mV}$$



## Região linear da configuração inversora

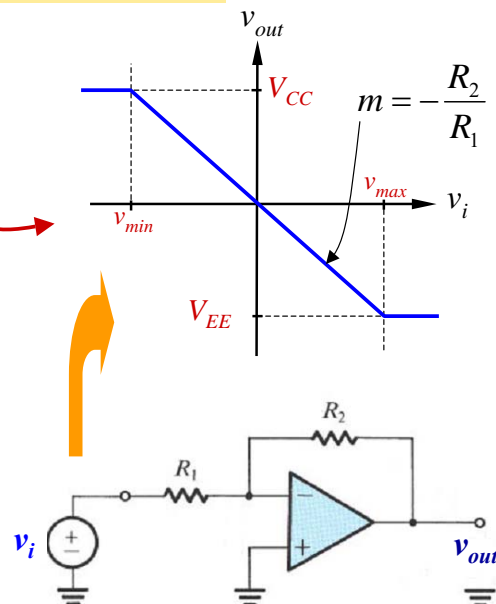
- Para que o OpAmp opere na região linear, o valor de  $v_i$  tem de se situar entre  $v_{min}$  e  $v_{max}$ .

- Substituindo  $v_{out} = -\frac{R_2}{R_1} v_i$

em  $V_{EE} < v_{out} < V_{CC}$

obtém-se:

$$-\frac{R_1}{R_2} V_{CC} < v_i < -\frac{R_1}{R_2} V_{EE}$$



- Assumi-se aqui que os limites de  $v_{out}$  são as tensões de alimentação, o que nem sempre é o caso.

## Modelo ideal do OpAmp

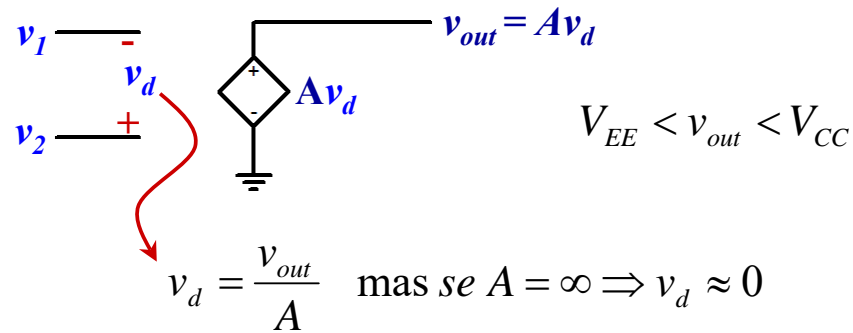
### OpAmp ideal

- A análise de circuitos com OpAmps é muito mais simples se considerarmos o ganho em tensão do OpAmp infinito:  $A = \infty$ . Adicionando este pressuposto ao modelo simplificado do OpAmp, obtemos:

### Modelo do OpAmp ideal

- $R_{in} = \infty$ ;
- Correntes nas entradas (+) e (-) do OpAmp são nulas;
- $R_o = 0$ ;
- $A = \infty$

## Curto-circuito virtual no OpAmp



- Como  $v_{out}$  é uma tensão de valor compreendido entre as tensões de alimentação do OpAmp (e.g.  $-15$  e  $+15V$ ) e  $A$  é muito elevado, então  $v_d$  é forçosamente **quase nulo**:

⇒ Podemos então admitir que existe um **curto-circuito (virtual)** entre as entradas (-) e (+) do OpAmp.

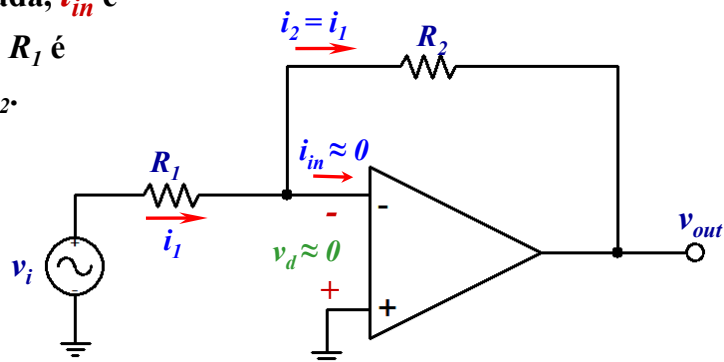
- Este curto-circuito virtual só existe se o amplificador estiver a funcionar na região linear (se não estiver saturado, ver pg. 6.1-11).

## Análise da configuração inversora usando o modelo do OpAmp ideal

- A análise deste circuito torna-se muito fácil se tivermos em mente que:

1) A tensão diferencial de entrada,  $v_d$  é nula  $\Rightarrow$  a corrente  $i_1$  depende apenas de  $v_i$ ;

2) A corrente de entrada,  $i_{in}$  é zero  $\Rightarrow$  a corrente em  $R_1$  é igual à corrente em  $R_2$ .



## Análise da configuração inversora usando o modelo do OpAmp ideal

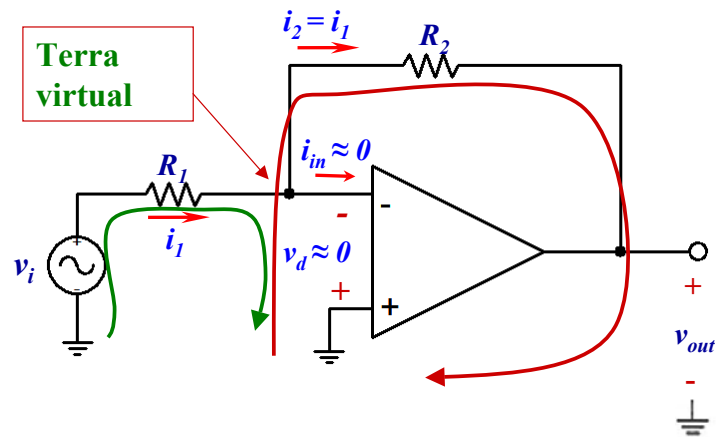
- As equações dos loops de entrada e de saída são agora:

$$-v_i + R_1 i_1 - 0 = 0$$

$$0 + R_2 i_1 + v_{out} = 0$$

- De onde se tira

$$\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

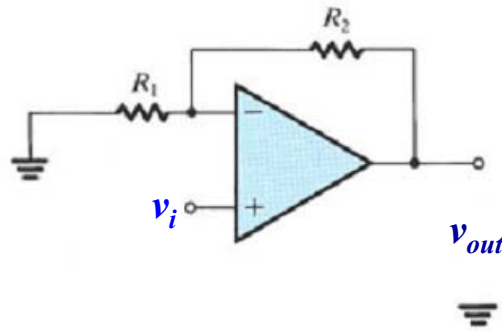


- Usando o modelo do OpAmp ideal conseguimos portanto chegar ao mesmo resultado de uma forma mais simples.

## Configuração não inversora



## Configuração não-inversora do OpAmp



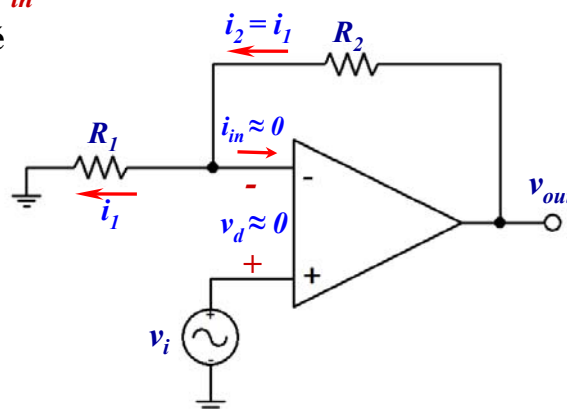
- Utiliza também duas resistências numa configuração de **realimentação negativa**;
- ... mas aqui o **ganho  $G$  é positivo**, razão porque a configuração se chama de não-inversora – quando a tensão de entrada,  $v_i$ , aumenta, a tensão de saída,  $v_{out}$  também aumenta.

## Análise da configuração não-inversora

- É feita de forma idêntica à da configuração inversora:

1) A tensão diferencial de entrada,  $v_d$  é nula  $\Rightarrow$  a corrente  $i_1$  depende apenas de  $v_i$ ;

2) A corrente de entrada,  $i_{in}$  é zero  $\Rightarrow$  a corrente em  $R_1$  é igual à corrente em  $R_2$ .



## Análise da configuração não-inversora

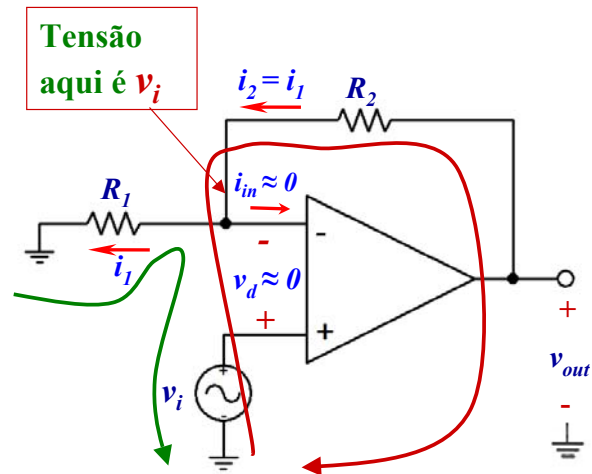
- As equações dos loops de entrada e de saída são agora:

$$-R_1 i_1 + v_i = 0$$

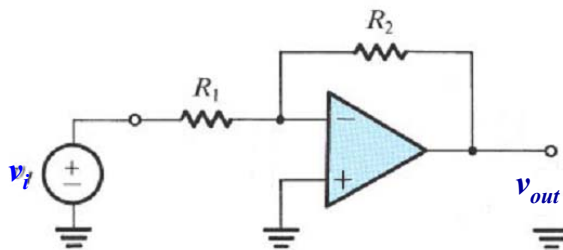
$$-v_i - R_2 i_1 + v_{out} = 0$$

- Eliminando  $i_1$  nas equações obtemos

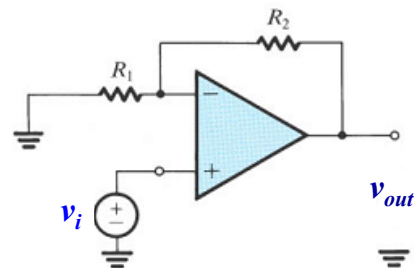
$$G \equiv \frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



## Conclusão: configurações inversora e não-inversora



**Inversora:**  $\frac{v_{out}}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$



**Não-inversora:**  $\frac{v_{out}}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

## Limite das aproximações obtidas com o modelo do OpAmp ideal

- Voltando à expressão precisa do ganho da configuração inversora:

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{A} \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{A} \right)}$$

- ...constatamos que as aproximações anteriores para o ganho são válidas se:

⇒  $A$  for muito grande;

⇒ e  $R_2/R_1 \ll A$ .

- Ou seja, perdem a validade para ganhos em malha fechada,  $G$ , com valores da ordem de  $A$ .